



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

ENGENHARIA DE PROCESSOS



UTILIZAÇÃO DO POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET) EM MISTURAS ASFÁLTICAS

JOSÉ DE ARIMATÉIA ALMEIDA E SILVA

Campina Grande – Paraíba

Junho de 2015

JOSÉ DE ARIMATÉIA ALMEIDA E SILVA

**UTILIZAÇÃO DO POLITEREFTALATO DE ETILENO
(PET) EM MISTURAS ASFÁLTICAS**

Orientadora: D. Sc. Maria Wilma Nunes Cordeiro Carvalho

Co-orientador: D. Sc. John Kennedy Guedes Rodrigues

Campina Grande – Paraíba

Junho de 2015

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: **JOSÉ DE ARIMATÉIA ALMEIDA E SILVA**

Título: **UTILIZAÇÃO DO POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET) EM
MISTURAS ASFÁLTICAS**

Tese defendida e aprovada em: 26/06/2015

Pela Banca Examinadora

(Assinatura): _____

Prof.^a D.Sc. (Orientadora) Maria Wilma Nunes Cordeiro Carvalho – UFCG / DEQ

(Assinatura): _____

Prof. D.Sc. (Orientador) John Kennedy Guedes Rodrigues – UFCG / UAEC

(Assinatura): _____

Prof. D.Sc. (Examinador Externo) Glauco Tulio Pessa Fabbri – EESC / USP

(Assinatura): _____

Prof. D.Sc. (Examinador Externo) Erinaldo Hilário Cavalcante - UFS

(Assinatura): _____

Prof.^a D.Sc. (Examinadora Interna) Lêda Christiane de F. Lopes Lucena – UFCG / UAEC

(Assinatura): _____

Prof. D.Sc. (Examinador Interno) Adriano Elísio de F. Lopes Lucena – UFCG / UAEC

DEDICATÓRIA

Dedico esta Tese a DEUS;

A minha avó Olindina Dias: in memoriam

Aos meus pais José de Anchieta e Maria de Lourdes

Aos meus irmãos Anchieta e Priscila

A Simone e ao nosso filho Gustavo

A G R A D E C I M E N T O S

A DEUS, fonte de misericórdia e iluminação, força constante nos momentos difíceis;

Aos orientadores Maria Wilma e John Kennedy pelos ensinamentos, orientação, apoio, atenção e incentivo durante a realização deste trabalho;

Aos professores Lêda, Ana e Adriano, pela orientação em todas as fases do trabalho, sempre com paciência e receptividade, tornando as tarefas mais fáceis;

Ao aluno Daniel Beserra pela dedicação em toda etapa da pesquisa;

Aos professores do curso de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Engenharia Civil e Engenharia de Materiais, que com muita dedicação contribuem para a formação de profissionais de destaque;

Ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos – LEP / UFCG;

A CAPES pela bolsa de estudos concedida;

Ao laboratorista Jadilson e ao ajudante Nildinho pelo apoio e ajuda em determinadas etapas da pesquisa;

Aos demais colegas Dennyale e Jonny, pela dedicação;

Aos funcionários da UFCG e ATECEL, que colaboraram de forma direta e indireta para a realização deste trabalho;

As instituições que tornaram o trabalho real devido ao apoio estrutural e financeiro (ATECEL, CAPES, CNPq, LEP).

RESUMO

A adição do resíduo de Politereftalato de Etileno (PET) em Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP), triturados em partículas cujo diâmetro está entre 0,6 e 0,074 mm, pode ser uma alternativa técnica viável para melhorar as propriedades mecânicas e reológicas das misturas asfálticas. Esta adição tem como finalidade proporcionar uma menor susceptibilidade das misturas asfálticas a fadiga e, conseqüentemente aumentar a vida útil de revestimentos asfálticos em regiões com clima tropical e a temperaturas elevadas. Este trabalho tem como objetivo principal a incorporação de um aditivo no Cimento Asfáltico de Petróleo. A adição de PET foi realizada em proporções de 4%, 5% e 6% relativas ao peso do teor de CAP ótimo e mensuradas as propriedades volumétricas e mecânicas. Além disso foram realizados análises físicas e reológicas do CAP puro e modificado. De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa pode-se inferir que o PET micronizado pós consumo corresponde a um polímero melhorador das propriedades reológicas do CAP 50/70, em termos de rigidez, proporcionando a mistura asfáltica um incremento no comportamento mecânico a luz dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência, Resistência por Umidade Induzida, Flow Number e Ruptura por Fadiga. É possível aceitar que “o resíduo do PET micronizado, no teor de 5% pode ser utilizado como agente modificador do CAP e, que o mesmo é capaz de promover ganhos nas Propriedades Mecânicas de Revestimentos Asfálticos.

Palavras Chave: Asfalto modificado, propriedades reológicas, polímeros.

ABSTRACT

The addition of polyethylene terephthalate (PET) waste in binder, crushed into particles whose diameter is between 0.074 and 0.6 mm, may be a viable alternative technique to improve the mechanical and rheological properties of asphalt mixtures. This addition is intended to provide a lower susceptibility of fatigue in asphalt mixtures and consequently improve the durability of asphalt mixtures in regions with tropical climate and high temperatures. This work has the objective the incorporation of an additive in binder. It was added in proportions of 4% 5% and 6% relative to the weight of the optimum binder content and it was measured volumetric and mechanical properties of asphalt mixtures. Also performed were physical and rheological analysis of pure and modified binder. According to the results obtained in this study can be inferred that the micronized PET improve the performance of binder 50/70. The addition of PET provided an increase in the mechanical behavior in the Indirect Tensile Strength, Resilient Modulus, Moisture susceptibility, Flow Number and Fatigue life. It is possible to accept that the use of 5% micronized PET waste may be used as modifying agent of binder, and that it improve mechanical properties of asphalt mixtures.

Keywords: binder, rheological properties, polymers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Pavimento (a) esforços em camadas (b) camadas genéricas.....	5
Figura 2.2 - Representação da estrutura coloidal do CAP.....	7
Figura 2.3 - Comportamento do CAP (Tempo x carga).	9
Figura 2.4 - Susceptibilidade térmica de CAPs.	9
Figura 2.5 - Comportamento ideal dos materiais.....	13
Figura 2.6 - Caracterização reológica dos CAPs.....	14
Figura 2.7 - Parâmetros reológicos.....	15
Figura 2.8 - Unidade química repetitiva do PET.	22
Figura 2.9 - Raios X do PET após cristalização a frio.....	26
Figura 2.10 - DSC de PET de uma garrafa pós consumo.	27
Figura 2.11 - Análise Termogravimétrica (TGA) e Análise Térmica Diferencial (DTA).	27
Figura 2.12 - Cadeias do Espectro de Infravermelho do PET.	28
Figura 3.1 - Agregados graúdos (a) brita 9,5mm; (b) brita 19,0mm (c) brita 25,0mm.....	35
Figura 3.2 - (a) Indústria “De PET Reciclagem” (b) Microprocessador (c) Pet micronizado.	36
Figura 3.3 - Amostra de CAP utilizada na pesquisa.	37
Figura 3.4 - Amostra de CAP utilizada na pesquisa.	38
Figura 3.5 - Difrátômetro: Laboratório de Caracterização de Materiais da - UFCG.....	41
Figura 3.6 - DSC 2920 Modulated: Laboratório de Caracterização de Materiais da - UFCG.	42
Figura 3.7 - DTG-60H/ DTA-TGA: Laboratório de Caracterização de Materiais da UFCG.....	43
Figura 3.8 - Reômetro <i>DHR-1</i> do LEP - UFCG.....	43
Figura 3.9 - Misturador de Cimentos Asfálticos Modelo 722D – LEP/UFCG.....	45

Figura 3.10 - Compactador Giratório (Superpave Gyratory Compactor – SGC) – LEP/UFCG.....	47
Figura 3.11 - Corpos de prova compactados.....	47
Figura 3.12 - Equipamentos utilizados para realização do ensaio de Resistência à Tração.....	49
Figura 3.13 - Equipamentos utilizados do ensaio de Resistência a Umidade Induzida.....	50
Figura 3.14 - Equipamentos utilizados para o ensaio de Módulo de Resiliência.....	51
Figura 3.15 - Equipamentos utilizados para realização do ensaio de Flow Number.....	54
Figura 4.1 - Curva granulométrica dos constituintes da mistura asfáltica (Agregado + PET).....	59
Figura 4.2 - Curva de Fuller [Limite inferior da faixa B do DNIT].....	60
Figura 4.3 - Curva de projeto teórica e real [Limite inferior da faixa B do DNIT].....	61
Figura 4.4 - Curva de Fuller [Limite intermediário da faixa B do DNIT].....	62
Figura 4.5 - Curva de projeto teórica e real [Limite intermediário da Faixa B do DNIT].....	62
Figura 4.6 - Curva de Fuller [Limite superior Faixa B do DNIT].....	63
Figura 4.7 - Curva de projeto teórica e real [Limite superior da faixa B do DNIT].....	64
Figura 4.8 - DRX para o PET micronizado pós consumo.....	64
Figura 4.9 - DSC para o PET micronizado pós consumo.....	65
Figura 4.10 - Análises de Termogravimetria (TG)/ Análise Térmica Diferencial (ATD).....	66
Figura 4.11 - Espectro de Infravermelho do CAP puro 50/70.....	67
Figura 4.12 - Espectro de Infravermelho do CAP com 4% de PET.....	67
Figura 4.13 - Espectro de Infravermelho do CAP com 5% de PET.....	68
Figura 4.14 - Espectro de Infravermelho do CAP com 6% de PET.....	68
Figura 4.15 - Relação do parâmetro G^* . sen δ em função da temperatura.....	69
Figura 4.16 - parâmetro G^* / sen δ em função da temperatura.....	70
Figura 4.17 - Grau de Desempenho (PG) do CAP puro e modificado.....	71

Figura 4.18 - Parâmetro G^* / $\sin \delta$ em função da temperatura.....	72
Figura 4.19 - Parâmetro $\tan \delta$ em função da temperatura.....	72
Figura 4.20 - Parâmetro Módulo Complexo δ em função da temperatura.....	73
Figura 4.21- Módulo complexo em função da tensão de cisalhamento.	74
Figura 4.22 - Gráficos de Fluência e Recuperação sobre Tensão Múltipla	75
Figura 4.23 - Percentual de recuperação (%) em função da complância.	76
Figura 4.24 - Propriedade mecânica de R.T. em Função do Percentual de PET	79
Figura 4.25 - Propriedades mecânicas a Umidade Induzida	80
Figura 4.26 - Propriedades mecânicas de Módulo de Resiliência	80
Figura 4.27 - Curva de projeto (CAP modificado).	81
Figura 4.28 - Ruptura por Vida de Fadiga.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Propriedades físicas do CAP utilizado na pesquisa.	37
Tabela 3.2 - Propriedades da cal utilizada na pesquisa.	38
Tabela 3.3 - Normas utilizadas para a caracterização dos agregados e filler.	39
Tabela 3.4 - Normas utilizadas para os ensaios de caracterização do CAP.	40
Tabela 4.1 - Massas Específicas real e aparente dos agregados graúdos.	56
Tabela 4.2 - Massas Específicas real dos agregados miúdos.	56
Tabela 4.3 - Resultado do ensaio de absorção em água (ME 081/98 do DNIT).	57
Tabela 4.4 - Resultado do ensaio de Índice de Forma.	58
Tabela 4.5 - Percentual passante da distribuição das partículas dos agregados.	59
Tabela 4.6 - Composição dos agregados do limite inferior [Faixa B do DNIT].	60
Tabela 4.7 - Composição dos agregados do limite intermediário [Faixa B do DNIT].	61
Tabela 4.8 - Composição dos agregados do limite superior [Faixa B do DNIT].	63
Tabela 4.9 - Parâmetros volumétricos em função dos teores de CAPs iniciais.	77
Tabela 4.10 - Dosagem para os teores de CAP estimados: curva intermediária	78
Tabela 4.11 - Propriedades volumétricas do CAP puro e adição de PET de 4%, 5% e 6%.	78
Tabela 4.12 - Propriedades mecânicas com o CAP Puro e Adição de PET de 4%, 5% e 6%.	79
Tabela 4.13 - Composição granulométrica para mistura de projeto – CAP modificado.	81
Tabela 4.14 - Dosagem para os CAPs + 5% PET : curva intermediária selecionada.	82
Tabela 4.15 - Propriedades volumétricas da dosagem Superpave com CAP modificado (5%) ...	82
Tabela 4.16 - Propriedades mecânicas da dosagem Superpave com CAP modificado (5%).	83
Tabela 4.17 - Resumo dos resultados das propriedades volumétricas.	83

Tabela 4.18 - Resumo dos resultados das propriedades mecânicas	84
Tabela 4.19 - Módulo de Resiliência com variação de temperaturas	85
Tabela 4.20 - Resultado da Deformação pelo critério diametral (Flow Number)	85
Tabela 4.21 - Resultados dos ensaios de Recuperação Elástica e Ductilidade	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Mecanismos de modificação dos asfaltos por polímeros.	11
Quadro 2.2 - Modificadores de asfalto nos Estados Unidos	20
Quadro 2.3 - Fatores que afetam a resposta a Fadiga	30

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 3.1 - Seqüência de procedimentos da dosagem com CAP Puro	34
Fluxograma 3.2 - Seqüência de procedimentos da dosagem com CAP Modificado.	35
Fluxograma 3.3 - Seqüência de atividades para a caracterização dos agregados.....	39
Fluxograma 3.4 - Seqüência de atividades para a caracterização do CAP	40
Fluxograma 3.5 - Seqüência de análise para a caracterização do PET	41
Fluxograma 3.6 - Seqüência da mistura (CAP+PET).	44
Fluxograma 3.7 - Seqüência de atividades para a Dosagem Superpave.....	46
Fluxograma 3.8 - Seqüência dos procedimentos do ensaio de Resistência à Tração.	48
Fluxograma 3.9 - Procedimentos do ensaio de Resistência a Umidade Induzida	50
Fluxograma 3.10 - Procedimentos utilizados para o ensaio de Módulo de Resiliência.	52
Fluxograma 3.11 - Procedimentos utilizados para a realização do ensaio de Fadiga.	53
Fluxograma 3.12 - Procedimentos utilizados para a realização do ensaio de Flow Number.....	55

LISTAS DE ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do Pet
ANAC	Agencia Nacional de Aviação Civil
ANP	Agência Nacional de Petróleo
ADP	Asfalto Diluído de Petróleo
ASTM	American Society for Testing and Material
ATECEL	Associação Técnico-Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	California Bearing Ratio
CGS	Compactador Giratório SUPERPAVE
CPA	Camada Porosa de Atrito
CL	Cura Lenta
CM	Cura Média
CR	Cura Rápida
DEC	Departamento de Engenharia Civil
DIRENG	Diretoria de Engenharia da Aeronáutica
DOT	Department Officials Transportation
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-estrutura e Transporte

FAA	Federal Aviation Administration
Gmm	Massa Específica Máxima Medida
Gsb	Massa Específica Aparente
HMA	Hot Mix Asphalt
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LUBNOR	Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste
MR	Módulo de Resiliência
MSCR	Fluência e Recuperação sobre Tensão Múltipla
NBR	Norma Brasileira Registrada
NSMA	Norma de Infra-Estrutura da Aeronáutica
PG	Performance Grade
PET	Politereftalato de Etileno.
RBV	Relação Betume Vazios
RRT	Relação da Resistência à Tração
RT	Resistência à Tração
RTFO	Rolling Thin Film Oven
SBS	Estireno Butadieno Estireno
SHRP	Strategic Highway Research Program
SGC	Superpave Gyratory Compactor
SMA	Stone Matrix Asphalt
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavements
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
VAM	Vazios do Agregado Mineral

VV	Volume de Vazios
VTM	Vazios na Mistura Total
ZR	Zona de Restrição
WMA	Warm Mixasphalt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2	HIPÓTESE	2
1.3	OBJETIVO	3
	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>3</i>
	<i>Organização da Tese</i>	<i>4</i>
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1	INTRODUÇÃO	5
2.2	CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO - CAP	6
2.3	PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO CAP	12
2.4	ASFALTO MODIFICADO	16
2.5	POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET).....	22
	<i>Aplicação do PET.....</i>	<i>23</i>
	<i>Caracterização do PET</i>	<i>26</i>
2.6	DOSAGEM SUPERPAVE	28
2.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
3	MATERIAS E MÉTODOS	34
3.1	SELEÇÃO DOS MATERIAIS	35
	<i>Agregados graúdos.....</i>	<i>35</i>
3.2	POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET).....	36
3.3	CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO	37
3.4	ENVELHECIMENTO A CURTO PRAZO	38
3.5	CAL HIDRATADA (FILER)	38
3.6	PROPRIEDADES QUÍMICAS E FÍSICAS DOS MATERIAIS	39
	<i>Agregados.....</i>	<i>39</i>
	<i>Cimento asfáltico de petróleo – CAP.....</i>	<i>40</i>
	<i>Politereftalato de Etileno - PET.....</i>	<i>40</i>
	<i>Difratograma de raios X do PET.....</i>	<i>41</i>
	<i>Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....</i>	<i>41</i>
	<i>Termogravimetria (TG)/ Análise Térmica Diferencial (DTA)</i>	<i>42</i>
3.7	ENSAIOS REOLÓGICOS DO CAP PURO E MODIFICADO	43
	<i>Ensaio de Estabilidade a Estocagem.....</i>	<i>44</i>
3.8	DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	44
	<i>Misturas asfálticas.....</i>	<i>44</i>

3.9	PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	47
	<i>Ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral (RT)</i>	48
	<i>Ensaio de Resistência a Umidade Induzida</i>	49
	<i>Ensaio de Módulo de Resiliência</i>	51
	<i>Ruptura por Fadiga</i>	52
	<i>Ensaio de Deformação pelo critério diametral (Flow Number)</i>	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1	PROPRIEDADES DOS CONSTITUINTES DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.	56
	<i>Equivalente de Areia</i>	56
	<i>Massa Específica Real e Aparente</i>	56
	<i>Abrasão "Los Angeles"</i>	57
	<i>Formas das Partículas</i>	57
4.2	PROPRIEDADES DOS CONSTITUINTES DO PET.	64
	<i>Difratogramas de Raios X do PET micronizado pós consumo</i>	64
	<i>Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)</i>	65
	<i>Termogravimetria (TG)/ Análise Térmica Diferencial (ATD)</i>	66
	<i>Espectros de Infravermelho</i>	67
4.3	PROPRIEDADES REOLÓGICAS	69
	<i>Grau de Desempenho – PG</i>	69
	<i>Fluência e Recuperação sobre Tensão Múltipla – MSCR</i>	74
	<i>Ensaio de Estabilidade a Estocagem</i>	76
4.4	DOSAGEM SUPERPAVE COM O CAP PURO	76
4.5	PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.	78
4.6	DOSAGEM POR MEIO DO PROCEDIMENTO SUPERPAVE COM O CAP MODIFICADO	81
	<i>Ensaio de Deformação pelo Critério Diametral (Flow Number)</i>	85
	<i>Ruptura por Fadiga</i>	86
5	CONCLUSÕES	88
5.1	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	89
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A destinação final dos resíduos é um dos maiores desafios enfrentados pelas administrações públicas no Brasil e no mundo. Não há dúvida de que a sua gestão afeta diretamente as condições de saúde, sociais, ambientais, econômicas e até culturais de uma comunidade. O investimento financeiro na correta disposição do resíduo transforma-se em um grande aliado ao desenvolvimento sustentável, com benefícios de curto, médio e longo prazos para toda a comunidade.

A partir de 2010, após quase vinte anos em processo de tramitação, foi aprovada a Lei de nº 12.305/10 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que consta de instrumentos importantes para permitir o avanço necessário ao País em relação aos principais problemas de gestão do resíduo. Após a implementação desta, soma-se aos geradores de resíduos, exigências em relações às questões ambientais, sociais e econômicas decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2012). A PNRS prevê a redução, reutilização, tratamento e até mesmo a não geração de resíduos, com a elaboração de um consumo sustentável e um conjunto de instrumentos para propiciar o aumento da reciclagem e destinação ambientalmente adequada dos rejeitos. A principal meta da PNRS é alcançar o índice de reciclagem de resíduos de 20% em 2015.

Insere-se nesse contexto a utilização de resíduos de origem polimérica nas obras de engenharia, em particular na pavimentação de estradas, por apresentar vantagens como sua alta disponibilidade e seu baixo custo de aquisição.

As experiências utilizando materiais betuminosos com polímeros objetivando melhorar o desempenho dos asfaltos, não são recentes. Em 1901, iniciaram-se as aplicações práticas dos asfaltos modificados. Em 1902, em Cannes, foi construída a primeira rodovia usando asfalto modificado. Todas as modificações nos asfaltos, antes da Segunda Guerra Mundial foram feitas com borracha natural, pois este era o único material avaliado adequadamente na época. Os relatos quanto ao desempenho da rodovia foram positivos e, com o desenvolvimento dos materiais sintéticos macromoleculares, após a Segunda Guerra Mundial, novos materiais foram avaliados para serem utilizados como modificadores de asfalto (ZANZOTTO & KENNEPOHL, 1996).

Negrão (2006) cita os polímeros mais utilizados na modificação de CAPs para fins de pavimentação no Brasil: SBS (copolímero de estireno butadieno), SBR (Borracha de butadieno estireno), EVA (Copolímero de etileno acetato de vinila) e o RET (Coluna de etileno com dois copolímeros acoplados). A modificação dos CAPs é um processo comumente utilizado para melhorar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas, principalmente com relação à resistência à deformação permanente e

ao trincamento térmico ou por fadiga, resistência ao dano por umidade induzida e a uma possível diminuição do consumo energético para a execução de revestimentos asfálticos.

O PET é um dos produtos mais complexos para reutilização ou até mesmo reciclagem. A sua reutilização na mesma cadeia produtiva é inaceitável, visto que os recipientes tipo PET são mais propensos a absorver contaminantes que podem ser liberados ou contaminar os alimentos quando são encapsulados.

A adição de resíduos poliméricos em Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP), entre eles o Politereftalato de Etileno (PET) micronizado pós consumo pode ser uma alternativa técnica viável para aumentar as suas propriedades mecânicas em termos reológicos, a exemplo do aumento da rigidez, visto que ele é um plastômero, devendo proporcionar uma maior susceptibilidade das misturas asfáltica a fadiga e conseqüentemente aumento da vida útil de pavimentos em regiões com clima tropical com temperaturas elevadas.

Numa análise preliminar, considerando as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos produtos derivados de resíduos de garrafas plásticas (PET), é possível estabelecer a hipótese que estes podem servir como agente modificador do CAP contribuindo para o avanço tecnológico nos procedimentos utilizados na pavimentação asfáltica de rodovias do Brasil.

1.2 Hipótese

Partindo do pressuposto que “o resíduo do PET micronizado, com origem no pós consumo, pode ser utilizado como agente modificador do CAP e, que o mesmo proporciona melhorias nas Propriedades Mecânicas de Revestimentos Asfálticos” e como conseqüência a não rejeição desta hipótese, teria-se uma alternativa para uma melhor disposição de um resíduo sólido sobre o meio ambiente e o desenvolvimento de procedimentos e de técnicas para transformar e valorar um resíduo a partir da sua utilização como aditivo polimérico em cimentos asfálticos de petróleo.

Para atingir este objetivo, será verificada a validade da seguinte hipótese: os resíduos micronizados de PET podem ser utilizados como aditivos para melhorar as propriedades reológicas de Cimentos Asfálticos de Petróleo.

Para isso, as bases lógicas adotadas foram fundamentadas em Hempel (1981):

“A seqüência lógica de raciocínio necessária à verificação e conseqüentemente aceitação de uma hipótese pode ser o método ou “caminho” a ser adotado para aceitar a partir da não rejeição de uma hipótese em questão”.

Para este trabalho foi adotado o método de inferência indutiva, freqüentemente denominada de “o teste da hipótese”, isto é, a formulação de uma hipótese como tentativa de resposta a uma questão em estudo. Com isso, contrariamente ao que acontece na inferência dedutiva, se todas as premissas são verdadeiras, a conclusão é provavelmente verdadeira, mas não necessariamente verdadeira.

Para Rudio (1999), a hipótese é uma suposição que se faz na tentativa de explicar o que se desconhece. Esta suposição tem por característica o fato de ser provisória, devendo, portanto, ser testada para a verificação de sua aceitação. Neste sentido, hipótese é uma suposta resposta ao problema a ser investigado.

Do ponto de vista metodológico, a certeza acerca do método adotado encontra-se em concluir que a hipótese levantada poderá ser ou não rejeitada diante dos fatos observados segundo critérios preestabelecidos.

Porém, nenhuma hipótese poderá ser confirmada definitivamente, a menos que a inferência seja feita em função da população e não de uma amostra que se diz representativa. Com isso, para se verificar a hipótese formulada, optou-se por refutar ou rejeitar as hipóteses antagônicas ou “nulas”. Desta maneira, em caso de rejeição das hipóteses antagônicas, traz-se para a hipótese formulada um caráter de aceitação, que serão válidas até que estudos futuros demonstrem o contrário.

1.3 Objetivo

Este trabalho teve como objetivo principal a incorporação de um aditivo melhorador das propriedades reológicas do Cimento Asfáltico de Petróleo, CAP 50/70, em termos de rigidez, a partir da utilização de PET pós consumo micronizado.

Objetivos específicos

A partir de procedimentos de ensaios com amostras do PET, CAP, e dos Agregados, pretende-se:

- ✓ avaliar as propriedades microestruturais do PET;
- ✓ avaliar as propriedades reológicas de CAP Puro e com a adição de PET;
- ✓ estabelecer um processo para obtenção do teor ótimo de PET e CAP a partir da Dosagem Superpave de uma mistura asfáltica.

Organização da Tese

Esta Tese é composta de cinco Capítulos, a seguir é apresentada uma breve descrição dos assunto abordados em cada um deles.

Capítulo 1 – Composto de introdução, hipótese, objetivos e organização do trabalho.

Capítulo 2 – Compreende a fundamentação teórica, onde foram abordados os assuntos mais relevantes ao desenvolvimento deste trabalho tais como: Cimento Asfáltico de Petróleo, Propriedades Reológicas do CAP, Asfalto Modificado, Politereftalato de Etileno (PET) e Dosagem Superpave.

Capítulo 3 – Consiste nos procedimentos e/ou métodos experimentais, onde foram descritos todos os materiais utilizados na pesquisa, bem como os procedimentos experimentais adotados para o alcance dos objetivos da pesquisa.

Capítulo 4 – São discutidos e analisados os resultados obtidos durante a fase experimental.

Capítulo 5 – São apresentadas as conclusões com as sugestões para pesquisas futuras.

Por fim estão inseridas as Referências Bibliográficas e os Apêndices.

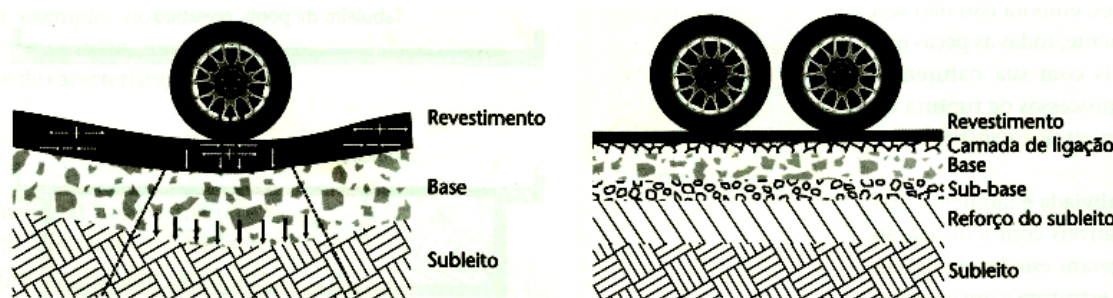
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo é apresentada uma revisão da literatura com aspectos relacionados ao foco da pesquisa e abordados os seguintes temas: Cimento Asfáltico de Petróleo, Propriedades Reológicas do CAP, Asfalto Modificado, Politereftalato de Etileno (PET) e Dosagem Superpave.

2.1 Introdução

A estrutura de um pavimento é constituída de um sistema em camadas, cujas tensões e deformações, impostas pelos esforços solicitantes do tráfego são transmitido pelo revestimento asfáltico, para as camadas intermediárias e a fundação denominada de subleito (Figura 2.1).

Figura 2.1 - Pavimento (a) esforços em camadas (b) camadas genéricas.



Fonte: Balbo, 2007.

Usualmente, os pavimentos são classificados em duas categorias: o pavimento flexível, constituído por um revestimento asfáltico sobre uma base granular ou de solo estabilizado granulometricamente, e pavimento rígido, constituído por placas de concreto assentes sobre o solo de fundação ou sub-base intermediária. Dependendo do volume de tráfego, da capacidade de suporte do subleito, da rigidez e espessura das camadas, uma ou mais camadas podem ser suprimidas.

O revestimento asfáltico é considerado uma camada, quase sempre impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e tem como premissa resistir aos esforços verticais e horizontais, proporcionando comodidade e segurança ao usuário. As condições de rolamento, por sua vez, dependem do comportamento funcional e estrutural do pavimento submetido às condições de intempéries, do tráfego e associado a compatibilidade das deformações de suas camadas.

No caso de pavimentos flexíveis, o revestimento é formado pela combinação do CAP com os agregados minerais sendo denominado de mistura asfáltica. Além destes, pode conter material de

preenchimento com função de melhorar, entre outras propriedades da mistura, a adesividade do “mástique”, asfalto mais filler, ao agregado. Uma das principais funções do CAP é atuar como um elemento de ligação entre as partículas minerais (MENDES, 2009).

2.2 Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP

Os asfaltos, definidos como materiais aglutinantes de cor escura são derivados do petróleo, sendo que o elemento predominante é o betume (99,5%). Este, muitas vezes usado como sinônimo de asfalto é uma substância aglutinante escura composta principalmente por hidrocarbonetos de alto peso molecular, totalmente solúvel em dissulfeto de carbono. Os mesmos podem ser utilizados em várias aplicações, como por exemplo, em impermeabilizações de construções civis e, principalmente em obras de pavimentação (DIAS, 2005).

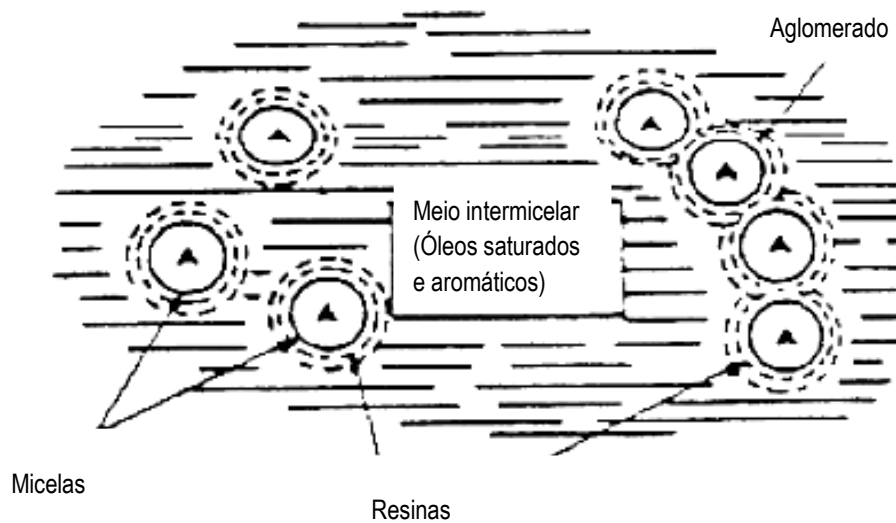
Os asfaltos podem ser encontrados em jazidas naturais, na forma de bolsões de asfaltos, originados de evaporação das frações mais leves (mais voláteis) do petróleo e aflorados à superfície em épocas mais remotas. Em obras de pavimentação, os asfaltos podem ser denominados ligantes asfálticos, CAPs ou materiais asfálticos.(ODA, 2000).

O CAP é um material termosensível utilizado para aplicação em trabalhos de pavimentação, pois, além de suas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, possui características de flexibilidade, e alta resistência à ação da maioria dos ácidos inorgânicos, sais e álcalis (FRANKLIM, 2007).

O CAP utilizado como um ligante é um material complexo em termos da sua constituição e do seu comportamento reológico caracterizando um dos mais antigos e versáteis materiais de uso em pavimentação. Conforme representado na Figura 2.2 os CAPs formam um sistema coloidal representado por uma suspensão de micelas de asfaltenos em um solvente composto de parafinas saturadas, cicloparafinas e estruturas aromáticas, cuja funcionalidade pode variar de polar a não-polar e de alifática a aromática (MOTHÉ, 2009).

As cadeias aromáticas e as resinas são componentes que influenciam na suscetibilidade térmica do CAP. As cadeias aromáticas em maior concentração amolecem o produto que agem como plastificantes. Por outro lado as resinas influenciam na contribuição da melhoria da ductilidade e dispersão dos asfaltenos que agregam ao CAP um aumento da viscosidade (NEGRÃO, 2006).

Figura 2.2 - Representação da estrutura coloidal do CAP.



Fonte: Adaptado de Morilha, 2004.

Somente sob condições extremas, o CAP se comporta como sólido elástico (baixa temperatura e rápido carregamento) ou como líquido viscoso (alta temperatura e lento carregamento). Portanto a susceptibilidade à temperatura e ao tempo de carregamento de um CAP é uma variável importante no desempenho de pavimentos, devendo ser quantificada por ensaios reológicos que determinem as propriedades fundamentais dos materiais (CASTRO, 2003).

O estudo dos CAPs representa um campo com evidente necessidade de pesquisas com o objetivo de desenvolver e viabilizar a utilização de novos produtos, capazes de tornar os pavimentos mais seguros, confortáveis e econômicos aos usuários, mediante redução ou retardamento do aparecimento de defeitos. Dentre as alternativas existentes destaca-se a incorporação do plastômero PET aos CAPs (ODA, 2000).

A escolha de um CAP para utilização nas misturas asfálticas envolve uma análise das suas características reológicas, físicas e químicas. Os parâmetros mais utilizados para classificar os CAPs são a sua consistência, que pode ser determinada a partir de ensaios convencionais como a penetração, a viscosidade, o ponto de amolecimento e de Fulgor.

Um fator importante a ser analisado é o envelhecimento do asfalto. Este ocorre devido à reação das moléculas orgânicas do CAP com o oxigênio do meio ambiente, ocasionando a oxidação, resultando na formação de uma estrutura mais dura ou rígida, influenciada pela diminuição da temperatura (CARO et al, 2014).

Os CAPs, quando na usina, sofrem um envelhecimento substancial em um curto intervalo de tempo. Posteriormente, durante a vida útil dos pavimentos, submetidos a determinadas condições ambientais e de carregamento, resultam no envelhecimento a longo prazo. Sendo assim, é importante simular o envelhecimento dos CAPs durante as fases de produção e de aplicação e também durante a vida em serviço para um conhecimento mais aprofundado sobre o comportamento mecânico das misturas asfáltica a curto e longo prazo.

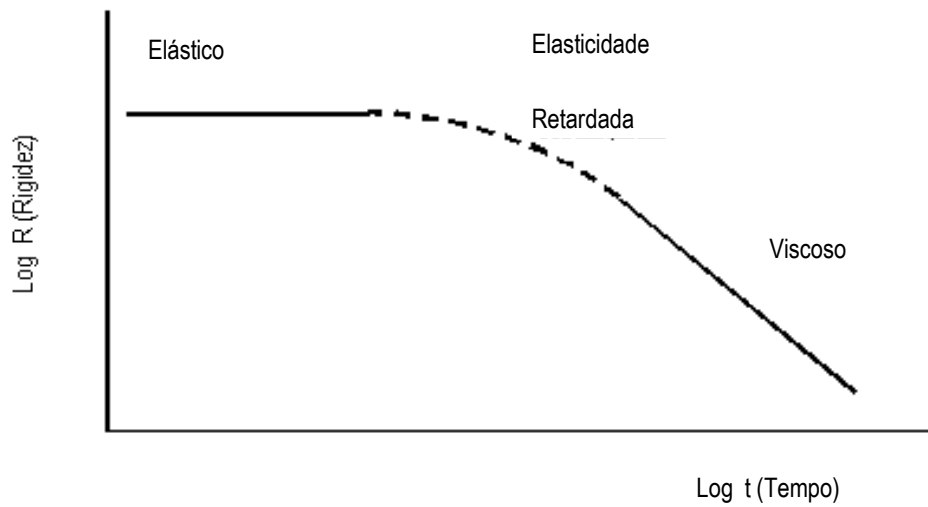
Apesar da ausência de material análogo aos CAPs quanto à sua aplicabilidade na construção de revestimento asfálticos, muitas vezes seu emprego requer o uso de aditivos para melhorar suas propriedades físicas, mecânicas e químicas, o que acaba alterando as propriedades reológicas do CAP (YAO et al, 2013).

A primeira especificação dos CAPs desenvolvida nos Estados Unidos foi baseada na aparência do asfalto natural e em ensaios químicos, usados para determinar a quantidade de betume (solúvel em dissulfeto de carbono) e de matérias orgânicas e inorgânicas presentes no asfalto. Com o crescimento da produção de misturas asfálticas, tornou-se evidente a necessidade de padronizar essas especificações para serem utilizadas na produção dessas misturas (ODA, 2000).

Pode-se observar, por meio da Figura 2.3, a curva de tendência do comportamento reológico do CAP em função da aplicação das cargas e do tempo. Este apresenta um comportamento viscoso, caracterizado pela fluência da aplicação de carga quando submetidos a esforços e a ação do meio ambiente.

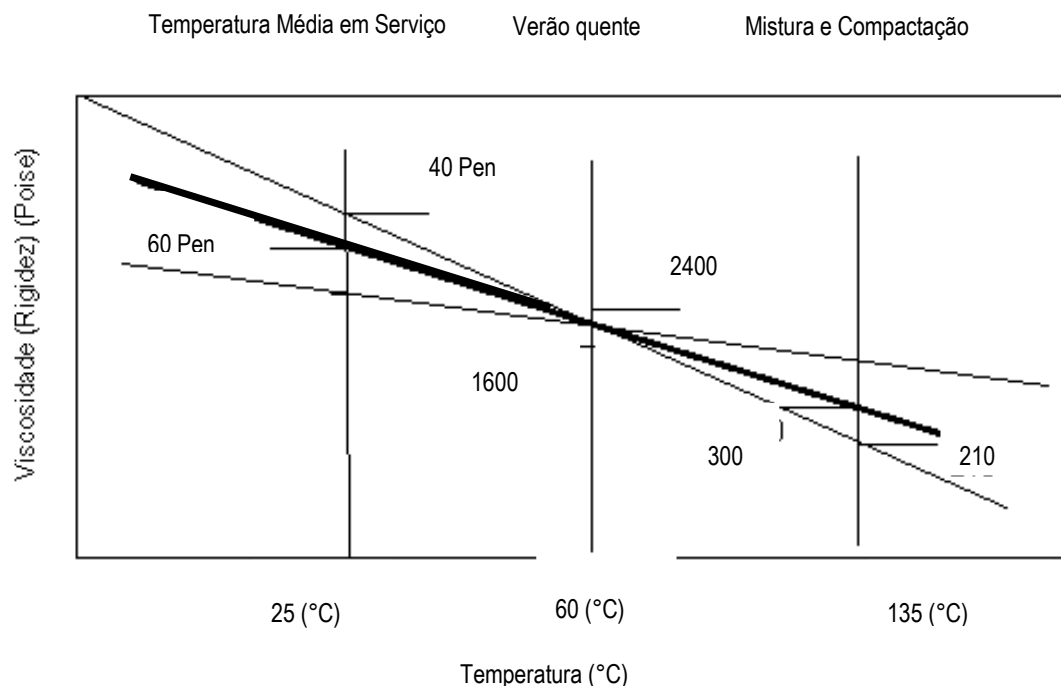
A susceptibilidade térmica do CAP é caracterizada pela alteração de suas propriedades mecânicas em função da temperatura média em serviço, verão quente, mistura e compactação conforme apresentado na Figura 2.4. Para ser utilizado em obras de pavimentação, é necessário que o CAP se comporte como um material termoplástico semi-sólido à temperatura ambiente, e que precisa ser aquecido para atingir a viscosidade adequada à mistura de trabalho, são temperaturas superiores como a 100 °C.

Figura 2.3 - Comportamento do CAP (Tempo x carga).



Fonte: Adaptado de Oda, 2000.

Figura 2.4 - Susceptibilidade térmica de CAPs.



Fonte: Adaptada de Oda, 2000.

Conforme apresentado na Figura 2.3 o asfalto é um material complexo, tanto do ponto de vista de composição química como de propriedades de engenharia. Apresenta um comportamento viscoso, caracterizado pela diminuição da rigidez para longos períodos de aplicação de carga, e susceptibilidade térmica (Figura 2.4), caracterizada pela alteração de propriedades (viscosidade, rigidez, consistência) em função da temperatura.

A variação de temperatura média do revestimento em serviço em relação ao verão é de 35 °C. Relativamente a essa temperatura a viscosidade do CAP é alta. A mistura e compactação ocorrem na faixa de temperatura de 135 °C tendo como alternativas para tornar o asfalto trabalhável, a diluição por meio de solventes derivados de petróleo e adição de um agente emulsificante.

A adesão dos constituintes do revestimento é uma propriedade que corresponde à interação de interface entre dois diferentes componentes da mistura asfáltica, o CAP e o agregado. Esta interação depende da composição do asfalto e sua modificação com a vida de uso do revestimento, porosidade da superfície agregada e natureza química de superfícies agregadas (QIN QIAN *et al.*, 2013).

Durante o tempo de vida útil dos pavimentos, os CAPs que constituem o revestimento passam por várias condições de envelhecimento, oxidações, associados com variações de temperatura e demandas de oxigênio. O envelhecimento pode alterar significativamente as propriedades reológicas de CAP e causar o seu enrijecimento, o que conduz à fragilização e redução da vida útil do revestimento asfáltico (PIZZORNO, 2010).

Devido à sua natureza viscoelástica, o CAP apresenta grande variação da consistência quando submetido a diferentes temperaturas, o que pode influenciar no desempenho do pavimento. Para evitar que ocorram problemas é importante conhecer a susceptibilidade térmica do CAP ou, melhor ainda, o seu comportamento reológico (ODA, 2000). Dentre os defeitos que ocorrem nos pavimentos flexíveis, dois se destacam: as trincas por fadiga do revestimento e o acúmulo de deformações permanentes nas trilhas de roda. As trincas por fadiga ocorrem devido às cargas repetidas do tráfego e, também, devido à falta de flexibilidade ou elasticidade no componente asfáltico do revestimento, que não consegue suportar as solicitações do tráfego pesado sem trincar.

A importância dos CAPs para o desempenho dos pavimentos flexíveis tem levado ao uso de aditivos poliméricos para melhorar suas propriedades reológicas, mecânicas e químicas, aumentando a resistência e evitando a formação de defeitos. Os polímeros são adicionados aos CAPs como agentes melhoradores de adesividade e agentes rejuvenescedores, além de alterarem as principais propriedades mecânicas da mistura asfáltica a baixa temperatura, quando o CAP em relação ao mecanismo de modificação, aumenta sua rigidez (Quadro 2.1).

Quadro 2.1 - Mecanismos de modificação dos asfaltos por polímeros.

% Polímeros na Mistura (em peso)	Resultados de Modificação
Baixa (<4%)	O CAP está na fase contínua e o polímero na fase despesa. Esta interação aumenta a coesão e a elasticidade do material. Há aumento do módulo resiliente sob baixas temperaturas e a rigidez do polímero é menor que do Cap, reduzindo sua fragilidade e, reduzindo, portanto, sua temperatura de vitrificação ou de cristalização.
Média (5%)	Poderá resultar numa estrutura com duas fases contínuas e intertravadas entre si. Mistura de controle mais difícil e com possíveis problemas de estabilidade coloidal.
Elevada (>7%)	Os polímeros tornam-se matriz. Os polímeros são plastificados pelos óleos aromáticos do CAP e os asfaltenos são dispersos. As propriedades do CAP alteram muito e dependem essencialmente daquelas dos polímeros. Resultaria em um adesivo termoplástico e não em um CAP modificado.

Fonte: Adaptado de Kandhal & Roberts, 1996.

Durante muito tempo os asfaltos foram caracterizados por métodos e controles tecnológicos convencionais, baseados em métodos empíricos, que não quantificam as propriedades mecânicas e que também não conseguem avaliar os efeitos dos agentes modificadores sobre o comportamento reológico dos CAPs (ODA, 2000).

Com os métodos teóricos e experimentais para dimensionamento de pavimentos, a previsão das tensões e deformações provenientes do tráfego e do clima que atuam na estrutura do pavimento passou a ser feita por métodos de cálculo que levam em consideração os esforços atuantes e as características de tensão e deformação dos materiais (BALBO, 2007). Desta forma, é necessário conhecer as características de respostas dos materiais às tensões impostas, ou seja, Módulos de Resiliência e coeficientes de Poisson que podem ser estabelecidos por ensaios de laboratório ou por correlações. Nos métodos de dimensionamentos mecanísticos, o módulo de resiliência do revestimento asfáltico é normalmente usado como parâmetro de cálculo no dimensionamento de pavimentos flexíveis.

Em se tratando do método de resiliência ou da deformabilidade estrutural das camadas que compõem a estrutura do pavimento, devem ser consideradas as propriedades dos solos e das misturas

asfálticas analisando as suas compatibilidades. Neste contexto, os polímeros interagem com a mistura asfáltica melhorando a deformabilidade elástica, e evitando o trincamento por fadiga do revestimento asfáltico, mecanismo principal da degradação da estrutura dos pavimentos em rodovias (MEDINA, 1997).

2.3 Propriedades reológicas do CAP

Os sólidos elásticos ideais respondem à aplicação de uma tensão por meio de uma deformação linearmente proporcional à força aplicada, que permanece enquanto a tensão é mantida. A deformação de um corpo pode ser espontânea e reversível, com a elasticidade, ou irreversível com o fluxo ou escoamento (BRINGEL, 2007).

Reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria por meio da análise das respostas (na forma de deformações ou tensões) de um material à aplicação de uma tensão ou de uma deformação (BRETAS & D'ÁVILA, 2005). Em síntese é o estudo do comportamento tensão-deformação de um material, considerando o tempo de aplicação do carregamento. A Fluência, por sua vez, é uma deformação lenta e progressiva do material quando este é submetido a tensão constante. Este comportamento é apresentado por materiais viscoelásticos.

O estudo da reologia dos cimentos asfálticos tem por objetivo principal o estudo da relação entre deformação, tensão, tempo de aplicação da carga e temperatura. A observância dessas propriedades é importante para a compreensão do desempenho do CAP, quando submetido a tensões provenientes do tráfego e a tensões térmicas devido a variações da temperatura do meio ambiente (NEGRÃO, 2006).

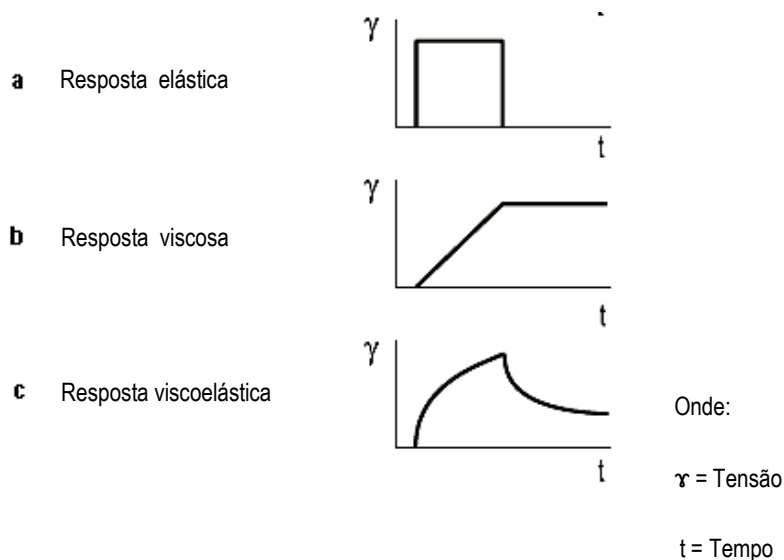
Segundo Faxina (2006), um dos ensaios mais simples para caracterização do comportamento de tensão-deformação de um material é o ensaio de Fluência. Nesse ensaio, uma carga de magnitude constante é aplicada ao material no instante t_0 . No instante t_i , essa carga é então removida. As diferenças entre os comportamentos elástico, viscoso e viscoelástico podem ser observados conforme apresentados na Figura 2.5 (a; b; c).

Os materiais, de uma forma geral, apresentam um comportamento que varia de acordo com o tipo de solitação (estático ou dinâmico), com as condições do meio ambiente (temperatura e umidade) e com as condições de confinado ou não confinado.

O estudo do comportamento tensão-deformação de um material, considerando-se também o tempo de aplicação do carregamento, se dá dentro da reologia. Conforme apresentado na Figura 2.5 (a), a resposta elástica ocorre quando o material retorna a seu estado anterior (não deformado) após cessado os esforços, também chamada deformação temporária ou recuperável. Na resposta viscosa (Figura 2.5 (b)) o material não volta ao seu estado inicial após cessado o esforço. A resposta viscoelástica (Figura

2.5 (c)) é caracterizada por materiais que estão submetidos a esforços que promovem deformação elástica com um lento retorno ao estado de não-deformação ao cessarem os esforços.

Figura 2.5 - Comportamento ideal dos materiais.



Fonte: Adaptado de Faxina, 2006.

A relação entre as tensões e as deformações em função do tempo de carregamento e da temperatura pode ser utilizada para explicar o conceito de rigidez de um CAP. A componente viscosa constitui a deformação permanente (ODA, 2000).

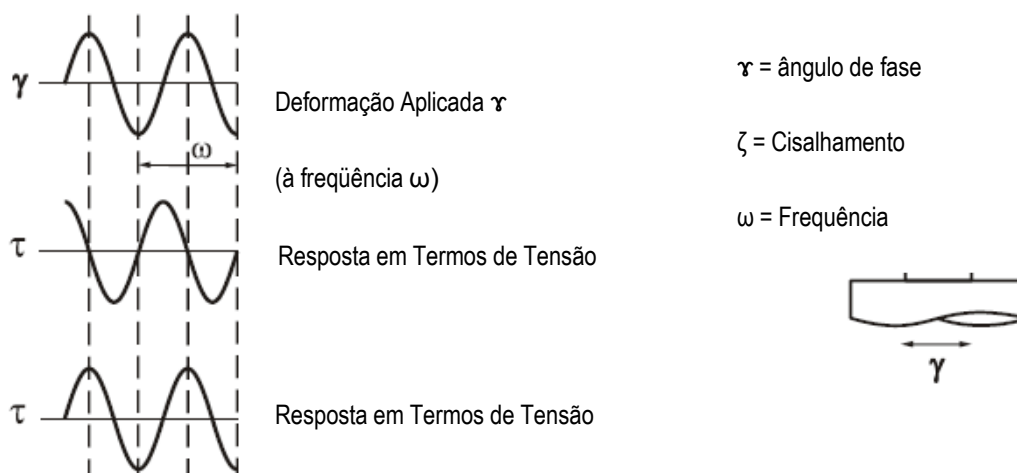
Os parâmetros mais comuns utilizados na prática que descrevem as misturas asfálticas como um material viscoelástico, solicitado por cargas cíclicas harmônicas são: o Módulo Complexo e o Ângulo de Fase (THEISEN, 2006). O Módulo Complexo relacionado com o Ângulo de Fase é utilizado para o entendimento das deformações permanentes das misturas asfálticas, enquanto que a associação desses dois parâmetros remete ao estudo de ruptura por fadiga.

Uma resposta em termos de tensão de um fluido viscoso ideal aparece quando o ângulo de fase é de 90° e uma resposta em termos de tensão de um sólido elástico ideal é caracterizado por um ângulo de fase de 0° . Ambas respostas são relacionadas com a deformação aplicada em uma determinada frequência.

Conforme apresentado na Figura 2.6, a determinação de parâmetros como o módulo complexo e o ângulo de fase, para caracterização reológica dos CAPs, é feita por meio dos ensaios dinâmicos empregando regime oscilatório (FAXINA, 2006). Nesse ensaio, a amostra é condicionada entre duas

placas paralelas, das quais uma se mantém fixa e outra gira, sendo submetida a ciclos alternados de tensão ou deformação senoidais.

Figura 2.6 - Caracterização reológica dos CAPs.



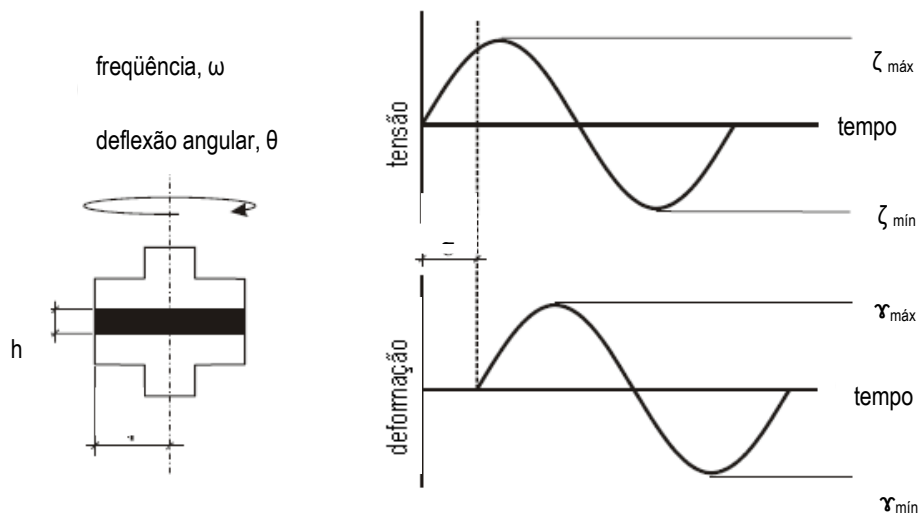
Fonte: Adaptado de Faxina, 2006.

O Módulo de Cisalhamento Dinâmico ou Módulo Complexo (G^*) é, portanto, a medida da resistência total do material à deformação quando exposto a pulsos repetidos de tensões de cisalhamento, e consiste de um componente elástico recuperável e de um componente viscoso não-recuperável (ODA, 2000).

Os valores de G^* e δ dos asfaltos dependem da temperatura e da frequência de carregamento. A temperatura alta, os asfaltos comportam-se como fluidos viscosos, sem nenhuma Capacidade de recuperação ou restauração. A baixa temperatura (menores que -20°C) os asfaltos comportam-se como sólidos elásticos.

Conforme apresentado na Figura 2.7, uma amostra de CAP irá alcançar a condição estável depois de um certo número de ciclos. Então, os picos de tensão e de deformação podem ser determinados. Como a tensão de cisalhamento e a deformação variam de forma senoidal com o tempo, os valores absolutos, determinados com um valor máximo menos o valor mínimo de tensão e de deformação são empregados no cálculo do módulo complexo. A razão entre a tensão máxima e a deformação máxima é o valor absoluto do módulo complexo (Faxina, 2006).

Figura 2.7 - Parâmetros reológicos.



Fonte: Faxina, 2006.

Os líquidos viscosos não possuem forma geométrica definida e escoam irreversivelmente quando submetidos a forças externas. Os sólidos elásticos apresentam forma geométrica bem definida e se deformam pela ação de forças externas. Muitos materiais, entre eles os de natureza betuminosa, apresentam um comportamento intermediário entre esses dois extremos, evidenciando tanto características viscosas como elásticas, e por este motivo, são caracterizados como viscoelásticos (THEISEN, 2006). Dessa forma, os materiais betuminos apresentam as seguintes características:

- ✓ aumento da deformação com o tempo (fluência) quando aplicada uma tensão constante;
- ✓ diminuição da tensão com o tempo (relaxação) quando aplicada uma deformação constante;
- ✓ rigidez dependente da taxa de aplicação de carga;
- ✓ dissipação de energia mecânica quando uma carga cíclica é aplicada.

Algumas das características citadas em parágrafos anteriores sobre a reologia dos CAPs são importantes em relação ao estudo das misturas asfálticas, pois descrevem o que ocorre durante os ensaios usualmente empregados em seu estudo. Materiais viscoelásticos têm a sua relação entre tensões e deformações dependente do tempo.

O revestimento asfáltico passa pelas etapas de mistura (normalmente feitas em usina), transporte, lançamento e compactação. Nessas etapas, o CAP deve apresentar o comportamento fluido, facilitando sua mistura com os agregados minerais e aumentando a eficiência da compactação. A viscosidade é utilizada para caracterizar o comportamento dos CAPs a altas temperaturas e é definida como a relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e sua taxa de deformação (LIMA, 2008).

Para a caracterização dos CAPs, visando o controle de qualidade nas etapas de mistura e compactação, tem sido utilizado o viscosímetro rotacional Brookfield, que determina a viscosidade aparente. A viscosidade do CAP é usada para garantir um asfalto fluido o suficiente para ser bombeado e misturado com o agregado (ODA, 2000).

Portanto, corpos considerados idealmente viscosos exibem escoamento, onde a taxa de deformação é uma função da tensão. Um corpo viscoso ideal não pode suportar uma tensão, uma vez que esta é aliviada a medida que ocorre o escoamento. A energia de deformação se dissipa no meio fluido viscoso, sob a forma de calor (BRINGEL, 2007). A maioria dos corpos reais, entretanto, não se comporta nem como sólidos nem como fluidos ideais. Os chamados fluidos viscoelásticos apresentam um comportamento viscoso e elástico, onde a tensão aplicada é parcialmente acumulada e dissipada sob a forma de energia calorífica.

Um projeto e/ou o dimensionamento de um pavimentos flexível deve considerar vários critérios que se relacionam com possíveis mecanismos de degradação dos revestimentos e demais camadas, tais como trincamento por fadiga, afundamentos de trilhas de roda, entre outros. Estes critérios têm como essência a comparação de um parâmetro admissível com um método que represente uma solicitação de serviço.

Essas solicitações são representadas por campos de tensões e de deformações (THEISEN, 2006). Outro mecanismo de degradação, o *Afundamento de Trilhas de Roda (ATR)*, é um fenômeno não necessariamente ligado somente às misturas asfálticas. A parcela do ATR inerente ao revestimento asfáltico tem sua previsão dependente do modelo constitutivo empregado, onde é consideradas a compatibilidade entre tensões e deformações das camadas que compõem a estrutura do pavimento.

2.4 Asfalto modificado

O uso de modificadores para melhorar as propriedades reológicas de um CAP, e, conseqüentemente, as misturas asfálticas, tem aumentado a cada ano. Os modificadores são adicionados aos CAPs com a finalidade de melhorar o desempenho dos pavimentos, aumentando a resistência ao acúmulo de deformações permanentes e ao aparecimento de trincas por fadiga e de contração térmica, retardando o envelhecimento do material e melhorando a adesividade (LING et al., 1997).

O CAP Modificado é aquele que recebeu a adição de um agente modificador de origem natural, sintética ou polimérica. Mesmo que os CAPs convencionais, sem qualquer modificação, sejam adequados aos pavimentos aos quais são submetidos, alguns fatores contribuem progressivamente para a utilização desses modificadores, tais como:

- ✓ aumento no volume do tráfego; e
- ✓ aumento da carga por eixo, em veículos pesados.

Os asfaltos modificados são utilizados em locais de grandes solicitações, tais como interseções de ruas movimentadas, aeroportos e faixas de rolamento de pistas com veículos com eixo de projetos superiores a 10⁷.

A percolação de água pode causar perda de resistência do CAP, como resultado da oxidação. Desta maneira, surgiu uma demanda na obtenção de um pavimento com revestimento asfáltico de maior resistência. Os modificadores de CAPs surgem como uma melhor opção no aprimoramento das propriedades térmica, reológica e mecânica dos pavimentos (MOTHÉ, 2009).

A busca por processos de modificação dos CAPs para tornar o material mais rígido ao receber esforços (sofrendo menores deformações) e mais mole ao aliviar os mesmos esforços (apresentando maior recuperação elástica) teve início nos anos 1970.

Os polímeros macromoleculares termoplásticos (plastômero e/ou elastômero) começaram a ser aplicados na modificação dos asfaltos, com os seguintes objetivos:

- ✓ elevar a coesão do material (CAP);
- ✓ reduzir a suscetibilidade térmica do CAP;
- ✓ baixar a viscosidade à temperatura de aplicação;
- ✓ apresentar elevada resistência à deformação plástica, à fissuração e à fadiga;
- ✓ garantir uma boa adesividade; e
- ✓ melhor resistência ao envelhecimento.

Os polímeros são substâncias orgânicas compostas, de pesos moleculares múltiplos, variando de mil a um milhão, com unidades químicas repetidas em cadeias. São obtidos diretamente da natureza, a partir de madeiras, óleos lubrificantes e cortiça ou elaborados artificialmente pela união de compostos de moléculas pequenas (Monômeros).

A classificação básica ocorre pela sua forma de ocorrência (naturais ou sintéticos), pela forma de preparação, no caso de sintéticos (por adição ou copolimerização); pela forma de sua cadeia molecular (homogêneos ou heterogêneos); pela forma de sua estrutura (planar, tridimensional); ou ainda com base em distinções quanto a processos industriais.

Os polímeros podem ser:

- ✓ termofixos: quando submetidos ao calor endurecem de maneira irreversível;
- ✓ termoplásticos: amolecem quando submetidos ao calor e endurecem quando resfriados;
- ✓ elastômeros: possuem propriedades elásticas semelhantes às borrachas, ao receberem calor se decompõem antes mesmo de amolecerem;
- ✓ elastômeros termoplásticos: apresentam comportamento de termoplástico quando são aquecidos e são ainda muito elásticos quando resfriados.

Quanto aos processos de polimerização, são chamados por adição quando apenas um tipo de monômero é empregado ou por copolimerização quando dois ou mais tipos de monômeros são empregados. Polímeros com melhores propriedades são geralmente obtidos neste último caso.

A modificação por polímero estende a vida funcional das estradas, podendo resultar em:

- ✓ maior resistência às trilhas de roda (misturas mais duras à alta temperatura);
- ✓ maior resistência a trincas térmicas (misturas mais moles em temperaturas baixas);
- ✓ maior resistência a oxidação e ao envelhecimento;
- ✓ maior resistência à ruptura de fadiga (misturas mais flexíveis a temperaturas intermediárias).

A adição de um polímero termofixo a um CAP pode produzir um ligante de excelente qualidade e desempenho, embora normalmente sejam onerosos o que o tornam um fator limitante são ativadas como agentes de endurecimento, o que ocasiona uma queda rápida de viscosidade da mistura.

Um polímero de natureza exclusivamente termoplástica não modifica propriamente um CAP, causando simplesmente aumento de sua consistência, como se fosse um material fino de enchimento de massa (BALBO, 2007). Os polímeros elastômeros são capazes de absorver níveis de deformação resiliente (elástica), e não podem ser adicionados e homogeneizados antes do aquecimento com os CAPs por meio de emulsificação prévia do elastômero em fase aquosa, para posterior miscigenação com

uma emulsão asfáltica, sendo o látex adsorvido sobre a superfície dos glóbulos de asfalto contidos na emulsão.

Os elastômeros termoplásticos atualmente são os materiais poliméricos mais empregados para a modificação do CAP, permitindo uma alteração em seu comportamento, diminuindo a sua suscetibilidade térmica tornando-o mais estável em uma faixa mais ampla de emprego. Em climas quentes, quando ocorrem aumentos de temperatura nas misturas asfálticas, ultrapassando o ponto de amolecimento de um CAP, os elastômeros mantêm-se sólido, conseguindo assim reter o aumento de fluxo viscoso no CAP (MASHAAN *et al.*, 2014).

Os plastômeros, em fase de estudos mais aprofundados, ainda pouco utilizado por meio do PET em seu estado micronizado, modificam os asfaltos e confere as misturas abertas maior durabilidade, visando melhorar as propriedades do pavimento e inovar os estudos de polímero termoplástico (Plastômero). Em pesquisas anteriores (AHMADINIA, 2012) foi estabelecida a adição do PET como agregado, especificamente em filetes.

Aplicações práticas de asfaltos modificados se iniciaram em 1901 na França. A primeira estrada construída com asfalto modificado por borracha ocorreu em 1902, em Cannes. Os asfaltos modificados antes da Segunda Guerra Mundial eram constituídos pela adição de borracha natural, que era o material disponível na época (SOUZA, 2010).

O principal objetivo em se combinar asfalto com polímeros é inibir a formação de trincas por fadiga e prolongar a vida útil dos pavimentos, além de aumentar a resistência ao acúmulo de deformação permanente a altas temperaturas e a formação de trincas por origem térmica quando submetidos a baixas temperaturas (LIMA, 2005).

Conforme apresentado no Quadro 2.2, a utilização de diversos polímeros ao CAP vem sendo ampliada a cada estudo conforme o desempenho conferido as misturas asfálticas. Pode-se observar, conforme a classe, a relação entre os tipos de modificadores e sua aplicação para melhores desempenhos mecânicos do pavimento, entre eles: SBS - Estireno-butadieno-estireno, EVA - Etileno-acetato de vinila e BMP - Borracha moída de pneus.

Quadro 2.2 - Modificadores de asfalto nos Estados Unidos

Modificadores	Deformação Permanente	Trincamento Fadiga	Trincamento Baixas Temperaturas	Envelhecimento Oxidativo
Elastômeros	SBS	SBS	SBS	-
Plastômeros	EVA	EVA	-	-
Borracha Moída de Pneus	BMP	BMP	BMP	-
Hidrocarbonetos	Asfalto Mineral	Asfalto Mineral	Asfalto Mineral	-
Fibras	Prolipropileno	Prolipropileno	Prolipropileno	-
Fíler Mineral	Cal Hidratada	Cal Hidratada	Cal Hidratada	Cal Hidratada
Antioxidantes	-	-	-	Cal Hidratada
Extensores	Enxofre	Enxofre	Enxofre	-

Fonte: Adaptado de Anderson et al., 1992.

Os polímeros devem ser quimicamente compatíveis com o asfalto a ser modificado, para que posteriormente não ocorra a separação de fases das misturas.

Cada polímero tem um tamanho de partícula específica para melhorar as propriedades reológicas do ligante asfáltico, e a modificação da composição química do material conduz inevitavelmente à modificação da sua estrutura e suas propriedades. Segundo Figueroa-Infante *et al.* (2009), a mistura do ligante asfáltico com um polímero pode apresentar as seguintes condições:

- ✓ Mistura heterogênea: Ela ocorre quando o ligante asfáltico e o polímero são incompatíveis. Os componentes da mistura são separados e o conjunto tem as mesmas características de ligação que o original;

- ✓ Mistura completamente homogênea: Neste caso, o aglutinante é extremamente estável, mas a alteração da utilização de propriedade é muito fraca em comparação com o asfalto original e só aumenta a sua viscosidade. Este não é o resultado desejado; e
- ✓ Mistura microeterogênea: Consiste de duas fases interligadas finamente. Esta é a consistência desejada. Num sistema deste tipo, o polímero incha após a absorção de parte da fração leve oleosa do ligante asfáltico para formar uma fase de polímero diferente que a fase de ligante asfáltico residual.

Para Bernucci et al. (2007) nem todos os polímeros podem ser adicionados ao CAP. Na mesma lógica, nem todos os cimento asfálticos podem ser passíveis da adição de polímeros. Assim, deve existir certo cuidado na escolha do polímero e do aglomerante para evitar problemas de compatibilidade e estocagem do material.

De acordo com Leite (1999) a adição de asfaltos naturais como gilsonita, asfaltita, asfalto de Trinidad, fileres e fibras, ampliam a resistência do cimentos asfálticos de petróleo. No entanto, a modificação na atualidade é realizada através do uso de polímeros (SBR, SBS, EVA, RET, etc.) ou por borracha de pneu.

Leite (1999) ainda afirma que existem diversas especificações referentes aos diversos tipos de polímeros existentes no mercado. Em geral, tais especificações baseiam-se nas propriedades referentes à tensão versus deformação, efeitos do calor, estabilidade, recuperação elástica, suscetibilidade térmica e módulo de rigidez. As misturas de asfalto com polímeros são sistemas de várias fases, sendo dividida geralmente por uma fase rica em polímero, outra em asfaltenos não adsorvidos pelo polímero, por último, existe uma terceira camada formada pelos maltenos. Mediante a situação demonstrada, pode-se observar uma separação dessas camadas mediante a condição cinética ou ao período de estocagem.

A compatibilidade entre o polímero e o CAP é fundamental nos processos de modificação. Problemas de heterogeneidade após a mistura incorrem em fases separadas dos materiais e o CAP poderia ter comportamento pior que o CAP original (MENEGUINI, 2011). A mistura, portanto deverá ser do tipo heterogênea, com duas fases intertravadas, quando o polímero se expandir ao absorver parte das frações oleosas do CAP. Nesta situação o CAP Modificado existirá uma fase polimérica e uma fase asfáltica.

Por outro lado, a mistura será completamente homogênea quando os óleos do asfalto dissolverem os polímeros por completo, destruindo as interações moleculares existentes resultando em um CAP estável, porém, sem alterar praticamente as propriedades do CAP, aumentando a sua viscosidade.

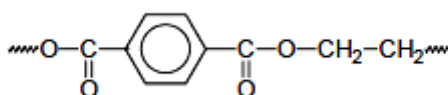
2.5 Politereftalato de Etileno (PET)

PET é um polímero de cadeia longa, que pertence à família genérica poliésteres e são formados a partir dos intermediários, ácido tereftálico (TPA) e do etilenoglicol (EG) que são ambos derivados de matérias-primas de petróleo. Em sua forma mais pura, é um material vítreo, amorfo, e que sob a influência da modificação direta como aditivos, desenvolvem cristalinidade. O alto preço de polímeros virgens e mão de obra barata são as forças motrizes para a reciclagem de resíduos de plásticos.

O consumo de PET para fabricação de embalagens encontra-se em constante crescimento, principalmente por causa da crescente substituição de embalagens de vidro e de folhas de flandres por garrafas plásticas. As principais vantagens dessa substituição são uma melhor relação custo/benefício para a indústria e propriedades mais atrativas para o consumidor final, incluindo leveza e resistência mecânica (RABELLO e WELLEN, 2008).

As características físicas e mecânicas de produtos PET dependem de uma combinação de variáveis que inclui as características do material, sua composição, cristalinidade, orientação molecular decorrente do processo e tensões internas geradas durante a fabricação. Como um polímero cristalizável, o PET apresenta uma grande dependência de suas propriedades com as condições de processamento. A sua estrutura molecular, caracterizada pelo oxigênio e carbono com ligações simples e duplas, apresenta grupos alifáticos contendo ésteres e grupos aromáticos conforme mostrado na Figura 2.8.

Figura 2.8 - Unidade química repetitiva do PET.



Fonte: Adaptado de Rabello, 2008.

O elevado peso molecular do PET é essencial para as boas propriedades mecânicas, tais como, rigidez, dureza e resistência à fluência, enquanto que ao mesmo tempo, dar uma flexibilidade suficiente para resistir à quebra sob pressão. O PET possui propriedades termoplásticas, isto é, pode ser reprocessado diversas vezes pelo mesmo ou por outro processo de transformação. Quando aquecidos a temperaturas adequadas, esses plásticos amolecem, fundem e podem ser novamente moldados.

Aplicação do PET

O plastômero PET é um poliéster, um dos plásticos mais comercializados em todo o mundo devido a sua extensa gama de aplicações. A Reciclagem deste colabora para a preservação ambiental. A atividade alcança plenamente o desenvolvimento sustentável com benefícios sociais, econômicos e ambientais. As embalagens de PET vêm inovando todo um setor industrial com suas facilidades. Essa indústria cresce sem proporções seguindo apenas as regras determinadas pelo próprio mercado de oferta e procura.

A reciclagem de qualquer material pode ser dividida em coleta, seleção, revalorização e transformação. Conforme estudos realizados na USP e publicados pelo Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE, 2012). O Brasil deixa de economizar 6 Bilhões de dólares ao ano por não reciclar os materiais presentes nas 200 mil toneladas de lixo gerados todos os dias. Ainda não estão contabilizados os custos de danos ambientais e sociais.

O PET é um importante plástico e extensivamente usado em todo o mundo, especialmente para a fabricação de recipientes de bebidas. A atual produção mundial de PET ultrapassa 6,7 milhões de toneladas/ano (KIM et al., 2010).

Trabalhos como os de CHOI et al. (2005), JO et al. (2007) e, KIM et al. (2010) analisaram os efeitos nas propriedades do concreto com treze adições de PET reciclado. As fibras de PET reciclado são facilmente misturadas no concreto e conferem novas propriedades ao material (OCHI, 2007). CHOI et al. (2007) estudaram os efeitos de agregados de resíduos de garrafas PET sobre as propriedades do concreto. A metodologia de trabalho, entre outros fatores, analisou concretos com substituição do agregado miúdo natural por agregado leve de resíduos de garrafas PET, nas razões de substituição de 0, 25, 50 e 75%. Os autores verificaram uma redução no peso específico e na densidade do agregado leve de resíduos de garrafa PET de 50% em relação ao convencional, se comparado com o agregado natural. Tal processo resultou em uma redução na resistência à compressão aos 28 dias com o aumento na relação de substituição do agregado miúdo natural por agregados de 15 resíduos de garrafas PET.

Com o passar dos anos, a necessidade do reaproveitamento de determinados materiais como as fibras de PET, polipropileno e raspas de pneu cresceram devido ao aumento da disponibilidade dos mesmos no meio ambiente. Por esse motivo, a técnica de reforço de solos através da inclusão de fibras e pneus, tem sido estudada por vários pesquisadores do mundo inteiro (CLAUMANN, 2007).

Ahmadinia (2012) adicionou em forma de filetes o PET em mistura asfáltica em teores entre 4% e 6%. Em geral, as propriedades mecânicas das misturas asfálticas foram melhoradas indicando tendências aceitáveis nesses limites de teores.

Desta forma, do ponto de vista da engenharia, desenvolver o uso e a produção de materiais que apresentem maior tempo de vida útil às misturas asfálticas, com menor impacto ambiental, reduzindo o consumo de recursos naturais e de energia empregada, agregaria um melhor desempenho ao estudo dos pavimentos.

O PET é um composto polimérico típico e simples. No entanto, muitas modificações são introduzidas para desenvolver propriedades específicas para as diversas aplicações de embalagem. A construção civil tem se constituído, nos últimos anos, como o mais importante mercado entre todos os atendidos pela indústria plástica (RODRIGUES et al., 2008). Verificaram a influência da adição de resíduos de PET - sobre a resistência mecânica em concreto de cimento Portland. O PET foi utilizado no formato encontrado na indústria de reciclagem de embalagens. Os resíduos foram utilizados como substitutos de parte dos agregados do concreto. No mencionado no trabalho pode-se notar uma tendência de redução da resistência mecânica com o aumento da fração volumétrica de agregados de PET.

Este comportamento foi relacionado à menor interação química entre o polímero e a matriz cimentícia, bem como a porosidade residual gerada e, principalmente, devido à menor resistência mecânica intrínseca dos polímeros com respeito aos agregados minerais que são muito mais resistentes mecanicamente. Do ponto de vista de aplicação e considerando os resultados obtidos, a substituição de agregados minerais por resíduos de PET pode ser usada na Indústria da Construção Civil para a fabricação de artefatos não estruturais, isto é, não limitados por normas específicas, sobretudo referentes à resistência mecânica. Neste caso, exemplos potenciais de utilização são: alvenaria interna de fechamento, capas para lajes nervuradas, capas para lajes pré-moldadas, material de enchimento (em escadas, rebaixos de nível, base de enchimento para pisos térreos de edificações).

O entendimento para o conhecimento das propriedades microestruturais do PET micronizado pós consumo depende das análises por meio das propriedades físicas e morfológicas em sua estrutura molecular. A cadeia polimérica do PET em sua forma mais pura aparenta um material cristalino ou semicristalino (Não Transparente) e sob a influência do processo de micronização pós consumo desenvolve transparência devido sua forma amorfa. Além disso, a cristalinidade pode ser desenvolvida por tratamento térmico do polímero fundido (SOUZA, 2012).

Na sua classificação, o PET se comporta como um polímero semi-cristalino quando aquecido acima de 72 °C com alterações para um estado vítreo elástico devido as formas onde as cadeias moleculares do polímero podem ser deformar e alinhar em qualquer uma direção para formar fibras, formando estruturas moleculares que compõem as películas das garrafas utilizadas nesse estudo (KLEIN, 2009).

Por causa das impurezas contidas no PET micronizado, pós consumo, uma quantidade limitada de sua cristalização pode ocorrer durante o arrefecimento, mantendo as misturas asfálticas nesse estágio com maior rigidez objetivando também uma melhor avaliação quando a estabilidade térmica, morfologia, e das propriedades viscoelásticas de asfaltos modificados por vários tipos de plastômeros (TAREFDER, 2010).

Outro tópico importante que contribui para melhorar as propriedades do PET e os seus efeitos no asfalto é o ajuste da sua estrutura molecular. Em relação ao comportamento do PET associado às misturas asfálticas, em moldes transparentes e amorfos, quando fundido e arrefecido rapidamente, o PET mantém o estado alongado, em seguida, a sua microestrutura é enriquecida, com sua cadeia polimérica restante intacta. Uma vez definido essa fase de estado enrijecida, o material é extremamente resistente e confere propriedades melhoradas aos asfaltos (CARDOSO, 2012).

Quando aquecido a uma temperatura de 72 °C sua forma é lentamente cristalizada, e o material começa a tornar-se opaco, mais rígido e menos flexível. Essa fase seguinte é conhecida como o PET cristalino. Nesta forma, é CAPaz de resistir a maiores temperaturas e pode ser adicionado ao CAP somando melhores desempenhos na performance mecânica de deformações dos pavimentos.

O PET tem suas propriedades caracterizadas, quando amorfo, pela sua transparência como vidro e apresenta uma resistência mecânica elevada considerando a sua leveza e uma grande Capacidade de resistir a deformações. Nesse estudo varias técnicas microestruturais foram utilizadas para entender o efeito de um asfalto puro e modificado esboçando por meio das análises o grau de avaliação dentro das misturas asfálticas.

O PET é classificado como um modificador termoplástico que, após o aquecimento, é suavizado a um estado fluido onde pode ser misturados ao asfalto e quando arrefecido, endurece e mantém sua forma original, adicionando a mistura asfática uma maior resistência a altas temperaturas e melhorando sua resiliência a baixas temperaturas.

O PET pós consumo apresenta caracterização que difere da sua forma original, quando as garrafas originalmente estão sendo produzidas para finalidade diversas. Essas diferenças encontram-se nas impurezas presente nas embalagens destinadas a diversos fins e que não são observadas, seja pela alta demanda do processo ou qualidade industrial, durante a sua reciclagem, especificamente para esse estudo, processo de micronização (RABELLO e WELLEN, 2008).

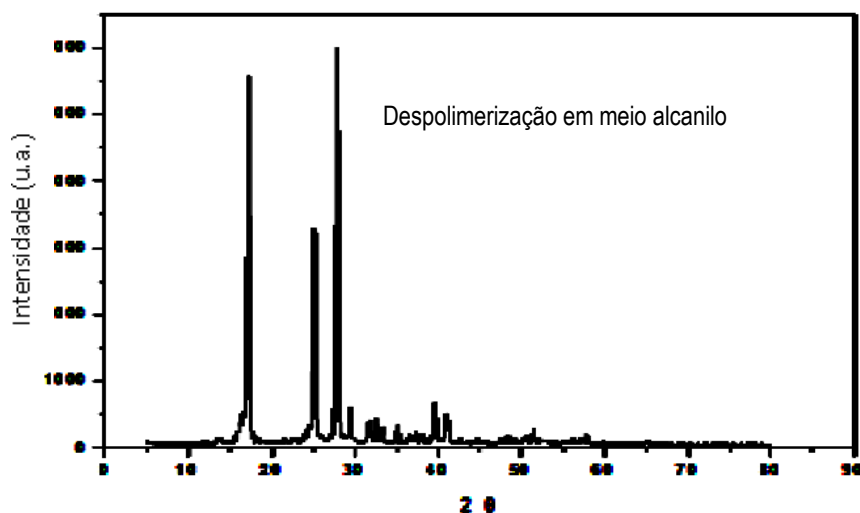
A difração de Raios X consiste na incidência de um feixe de Raios X sobre uma amostra sólida segundo um ângulo θ , sendo que o feixe difratado pelos átomos da estrutura, localizados nos planos cristalográficos hkl que deve satisfazer a Lei de Bragg.

$$n\lambda = 2 d n k l \sin\theta$$

Caracterização do PET

A difração ocorre quando o comprimento de onda da radiação é comparável aos espaçamentos da rede cristalina do material que causa difração. O padrão obtido é característico do material na amostra e pode ser identificado por comparação com padrões de uma base de dados. Com efeito, a difração de Raios X do pó fornece uma impressão digital da amostra. Essa técnica também pode ser usada para identificar o tamanho e o tipo da célula unitária, medindo-se o espaçamento das linhas no padrão de difração (HELSEN et al., 1998). Vanini (2010) apresentou a curva de Difração de Raios X do PET após a cristalização a frio (Figura 2.9).

Figura 2.9 - Raios X do PET após cristalização a frio.

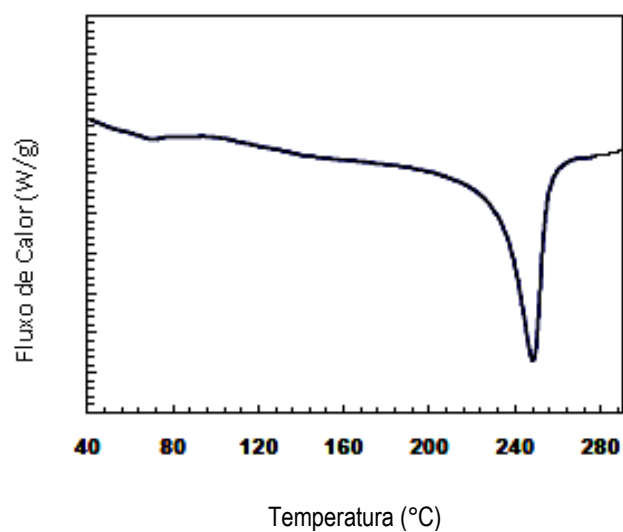


Fonte: Adaptado de Vanini, 2010.

De acordo com a curva de DRX pode-se observar alguma ordenada cristalográfica com picos bem definidos e linha de base bem uniforme.

Importante observar se o material mantém as propriedades químicas durante o processo em que é utilizado como polímero. Tais condições são observadas por meio da Figura 2.10 com a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) para o PET pós consumo.

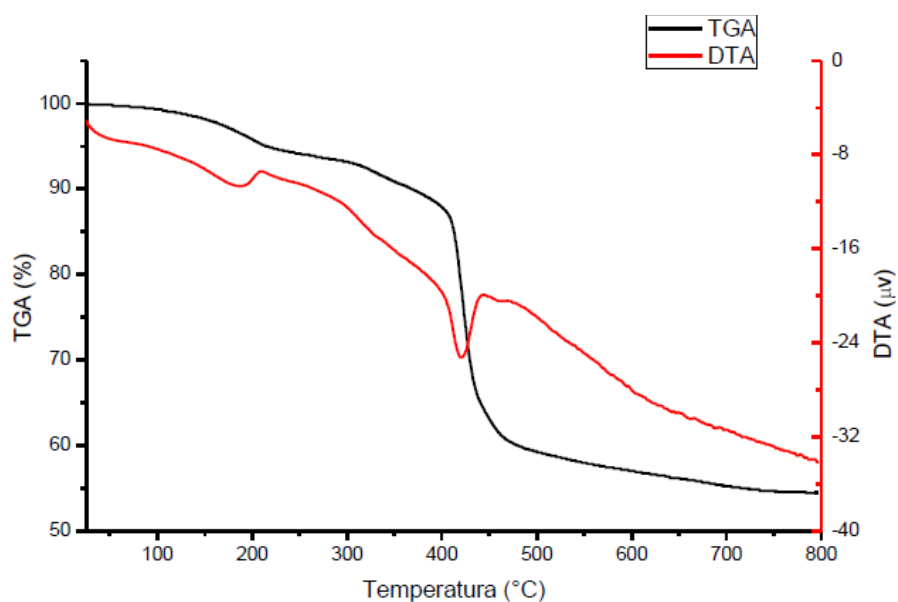
Figura 2.10 - DSC de PET de uma garrafa pós consumo.



Fonte: Adaptado de Rabello, 2008.

Souza (2012) realizou a Termogravimetria (ATG) e Análise Térmica Diferencial (DTA) do PET após o uso (Reciclado) do PET conforme pode-se observar na Figura 2.11.

Figura 2.11 - Análise Termogravimétrica (TGA) e Análise Térmica Diferencial (DTA).

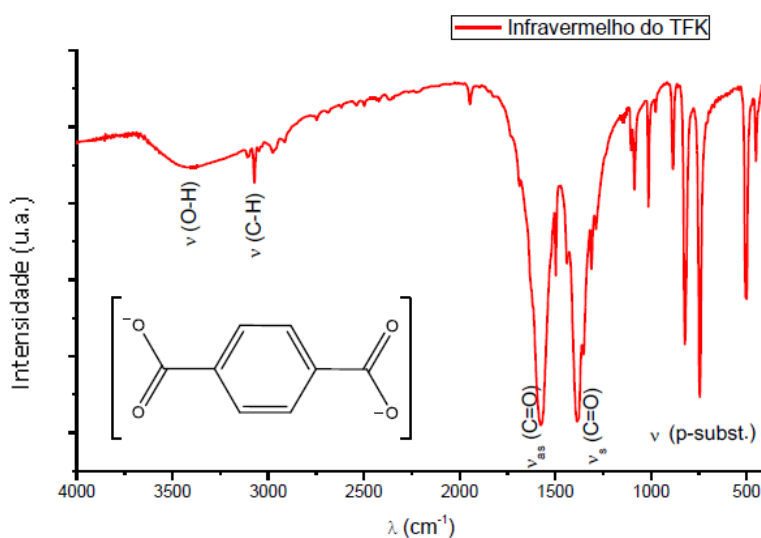


Fonte: Adaptado de Souza, 2012.

De acordo com o gráfico a curva de decomposição térmica mostra que a primeira perda de massa (50-200° C) associada ao pico endotérmico de 140° C é atribuída a água “fisissorvida” na superfície formando um composto anidro e instável.

Souza (2012) realizou análises de espectro no infravermelho do PET pós consumo conforme mostrado na Figura 2.12.

Figura 2.12 - Cadeias do Espectro de Infravermelho do PET.



Adaptado de Souza, 2012.

De acordo com o gráfico, pode-se observar na Figura 2.12 uma banda ampla entre 3200 - 3400 cm^{-1} que pode ser atribuída à água fisissorvida; vibração de estiramento assimétrica do grupo carboxilato com intensidade forte em 1573 cm^{-1} e estiramento simétrico com intensidade forte em 1384 cm^{-1} . Cabe ressaltar que as bandas do carboxilato foram encontradas em frequências um pouco mais baixas (1573 cm^{-1}) do que as do ácido tereftálico (1690 cm^{-1}).

Para o anel aromático, observam-se picos referentes ao estiramento (C–H) entre 3130 cm^{-1} e 2888 cm^{-1} , além de picos característicos de anel aromático para-substituído, dobramento fora do plano (=C–H) de maior intensidade em 744 cm^{-1} e uma absorção de intensidade fraca em 1946 cm^{-1} .

2.6 Dosagem Superpave

Segundo Roberts et al. (1996), o ideal ao compactar a mistura asfáltica em laboratório seria “simular”, o mais próximo possível da realidade, as solicitações impostas por diferentes tipos de carregamentos nas etapas de construção e de vida útil do pavimento. O teor de CAP asfáltico na mistura

seria estimado a partir de três variáveis: porcentagem de vazios, tráfego, e a vida útil da mistura. Com isso, os corpos de prova, obtidos em laboratório, representariam melhor as condições “in situ”, possibilitando a análise do comportamento mecânico da mistura e a estimativa do teor “ótimo” de asfalto em laboratório, relacionado ao desempenho do pavimento em campo.

A partir de outubro de 1987 a março de 1993, nos Estados Unidos, foi desenvolvido o Programa SHRP (Strategic Highway Research Program) que teve como objetivo geral a elaboração de especificações e a concepção de novos equipamentos para ensaios em CAPS e em misturas betuminosas a quente (HMA – Hot Mix Asphalt), associados com um conjunto de normas e equipamentos denominados “SUPERPAVE” (Superior Performing Asphalt Pavements).

O programa SRHP, atualmente bastante difundido nos Estados Unidos e no Canadá, constitui um dos avanços tecnológicos na área de projeto e de controle do desempenho de revestimentos constituídos de CAPs, no qual estão relacionados os experimentos com os fundamentos racionais aplicados a situações inerentes de cada região desses países.

O desenvolvimento a partir de técnicas e equipamentos do programa SRHP baseado no controle de qualidade e do desempenho dos CAPs em misturas com agregados, utilizados na pavimentação de estradas de rodagens, é de importância consensual entre os que atuam na área.

Um das metas principais do Programa SHRP, com respeito ao projeto de misturas asfálticas, foi desenvolver e/ou aprimorar um novo método de compactação em laboratório. Projetado para compactar amostras de “misturas asfálticas” (Hot Mix Asphalt- HMA), com uma densidade semelhante à obtida em campo sob tráfego, foi desenvolvido o Superpave Gyratory Compactor (SGC). Em princípio, considera-se que no processo de compactação utilizado pelo SGC ocorre uma redistribuição das partículas de agregados semelhante ao que ocorre em campo. O método preconiza para o revestimento em concreto de CAP: resistência à deformação permanente e resistência à fadiga.

O SGC é um dispositivo mecânico onde os componentes principais que compõem seu sistema têm como base a estrutura de reação, base rotativa e motor, o medidor de altura e sistema de registro de dados e de carregamento, cabeça de carga, medidor de pressão e o molde e placa base.

A especificação Superpave classifica as misturas asfálticas com base em critério de desempenho e leva em consideração as variações de temperatura e umidade, assim como o volume e a carga de tráfego. Além disso, para identificar as propriedades dos materiais relacionadas a vários danos, a especificação Superpave apresenta uma série de ensaios laboratoriais. As especificações são baseadas em propriedades fundamentais da engenharia, incluindo o comportamento tensão-deformação conforme os materiais selecionados.

Os ensaios adotados pelo programa SHRP permitem a simulação do comportamento dos CAPs por meio da realização de ensaios a temperaturas similares à dos pavimentos em serviço. Esses ensaios simulam três estágios críticos da vida do CAP. O primeiro estágio simula o comportamento dos asfaltos virgens durante o transporte, armazenagem e manuseio (ODA, 2000).

Um dos objetivos do Programa SHRP foi desenvolver especificações de CAPs com base no desempenho. Esse objetivo foi baseado na premissa de que os métodos e as especificações tradicionais existentes, e, atualmente em uso, não garantem um bom desempenho em longo prazo e que muito desses ensaios precisam ser revistos, substituídos ou eliminados.

O Programa SHRP, estabelecido pelo Congresso dos Estados Unidos, procurou desenvolver uma análise de materiais betuminosos e de misturas asfálticas com base em propriedades fundamentais (módulo de rigidez, resistência à ruptura por fadiga e resistência à deformação permanente). Esses fatores são baseados em propriedades diretamente relacionadas ao desempenho dos pavimentos em serviço, conforme está apresentado no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Fatores que afetam a resposta a Fadiga.

Descrição	Variação do Fator	Rigidez	Fadiga Tensão Controlada	Fadiga Deformação Controlada
Viscosidade do Asfalto	Aumento	Aumento	Aumento	Diminuição
Teor de asfalto	Aumento	Diminuição	Aumento	Aumento
Graduação do Agregado	Aberta para Contínua	Aumento	Aumento	Diminuição
Volumes de Vazios	Diminuição	Aumento	Aumento	Aumento
Temperatura	Diminuição	Aumento	Aumento	Diminuição

Fonte: Adaptado de Tangella et al., (1990).

O segundo estágio representa o asfalto durante a produção e aplicação da mistura, sendo simulado pelo envelhecimento em uma estufa de envelhecimento de rotação de filme fino (RTFO). O terceiro estágio é simulado pelo envelhecimento em vaso de pressão (PAV), onde amostras de CAP são expostas ao calor e à pressão para simular o envelhecimento durante a vida em serviço do pavimento.

Os produtos obtidos enquadram-se em quatro categorias gerais: novos materiais, ensaios, equipamentos e especificações, baseadas em modelos de desempenho empírico-mecanísticos, propostas de procedimentos para avaliação e desenvolvimento de modificadores, um sistema para controle da construção nas pistas e programas computacionais.

A seleção de um CAP pelo método Superpave começa pela determinação das temperaturas máxima e mínima do pavimento no local do projeto. O Superpave possui três métodos para auxiliar na seleção de um CAP:

- ✓ pela área geográfica: desenvolvimento de um mapa mostrando o tipo de CAP com base no clima e/ou em normas e orientações;
- ✓ pela temperatura do pavimento: necessidade de conhecer as temperaturas (máxima e mínima) do projeto do pavimento;
- ✓ pela temperatura do ar: necessidade de determinar as temperaturas do ar para convertê-las em temperaturas de projeto (do pavimento).

Sua classificação é composta por dois números em função do tráfego. O primeiro número corresponde à temperatura mais elevada do pavimento, aquela em que os ensaios que avaliam a resistência ao acúmulo de deformação permanente devem ser realizados. O segundo número corresponde à temperatura mínima do pavimento, aquela em que os ensaios que analisam a resistência às trincas por contração de origem térmica.

Os principais ensaios do método Superpave para avaliar o comportamento do CAP são:

- ✓ viscosidade aparente (Brookfield);
- ✓ cisalhamento dinâmico;
- ✓ envelhecimento de curto prazo;
- ✓ envelhecimento de longo prazo;
- ✓ ensaio de ponto de fulgor; e

✓ ensaio de ponto de amolecimento

Com o desenvolvimento do Programa SHRP, avanços foram obtidos na compreensão do comportamento reológico dos CAPs. Houve um acréscimo nos estudos sobre reômetros de cisalhamento dinâmico e reômetros de flexão, fornecendo informações para o estabelecimento de critérios, baseados em desempenho (MOTHÉ, 2009).

A dosagem de misturas asfálticas no Brasil segue o procedimento Marshall na maior parte dos casos. A maioria das misturas asfálticas a quente produzida nos EUA nos últimos 50 anos, entre 1940 e 1990, foi dosada utilizando a metodologia Marshall (ROBERTS et al., 1996). Desde 1993, porém, as universidades e departamentos de transporte americanos vêm utilizando a metodologia Superpave, ainda em fase de testes no Brasil e nos Estados Unidos também. Na pesquisa SHRP várias mudanças foram realizadas.

Como proposta, foi apresentada uma metodologia distinta que consiste basicamente em estimar um teor provável de CAP fixando o volume de vazios e a granulometria dos agregados disponíveis. Para alcançar o fim proposto são escolhidas três composições granulométricas distintas, dentro da faixa a ser adotada, calculando-se a seguir as prováveis características volumétricas que estas três misturas vão apresentar.

Importante lembrar que a seleção do CAP apropriado é realizada a partir do clima e da temperatura no pavimento onde será realizada a sua aplicação. A partir de uma classificação, os CAPs são agrupados de acordo com seu Grau de desempenho e são realizados estudos para adaptação das especificações Superpave de CAPs às condições brasileiras (LEITE et. al. 1994).

As especificações do SHRP substituíram as especificações vigentes, baseadas em propriedades reológicas empíricas (FAXINA, 2006). Uma das principais conclusões do programa SHRP foi que o comportamento viscoelástico dos CAPs, sob diferentes níveis de tensão e de temperatura, pudesse ser compreendido para que as especificações relativas ao desempenho fossem diretamente relacionadas aos defeitos do pavimento (SHENOY, 2001).

A caracterização da consistência de CAPs, por meio dos ensaios de penetração e viscosidade, apresenta limitações quando utilizada para seleção de CAPs e para estimativa do desempenho ao longo da vida em serviço. Apesar da viscosidade ser uma propriedade fundamental, ela apenas fornece informações sobre o comportamento viscoso a alta temperatura, sem nenhuma outra informação sobre o desempenho a média e a baixa temperatura (ODA, 2000). O ensaio de penetração, por sua vez, apenas descreve a consistência a uma temperatura intermediária, 25°C.

2.7 Considerações Finais

A importância dada ao tratamento dos resíduos vem agregando desafios às administrações públicas por afetar diretamente as condições de saúde, sociais, ambientais, econômicas e até culturais de uma comunidade. Soma-se a esse fator a Lei de nº 12.305/10 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) com instrumentos para permitir o avanço necessário ao País em relação aos principais problemas.

Este estudo aborda a importância da utilização de resíduos de polímeros nas obras de engenharia, em particular na pavimentação de estradas por apresentar vantagens como sua disponibilidade e seu baixo custo de aquisição. Em contrapartida, com a utilização desses reciclados como polímeros, entre eles o PET micronizado pós consumo, melhoraremos algumas propriedades mecânicas das misturas asfálticas como garantia de obras mais duradouras e com melhores qualidades.

Entretanto, cuidados devem ser tomados em relação ao armazenamento em obras. O processo de mistura entre o CAP e o PET micronizado pode resultar em uma fase heterogênea com falta de estabilidade à estocagem.

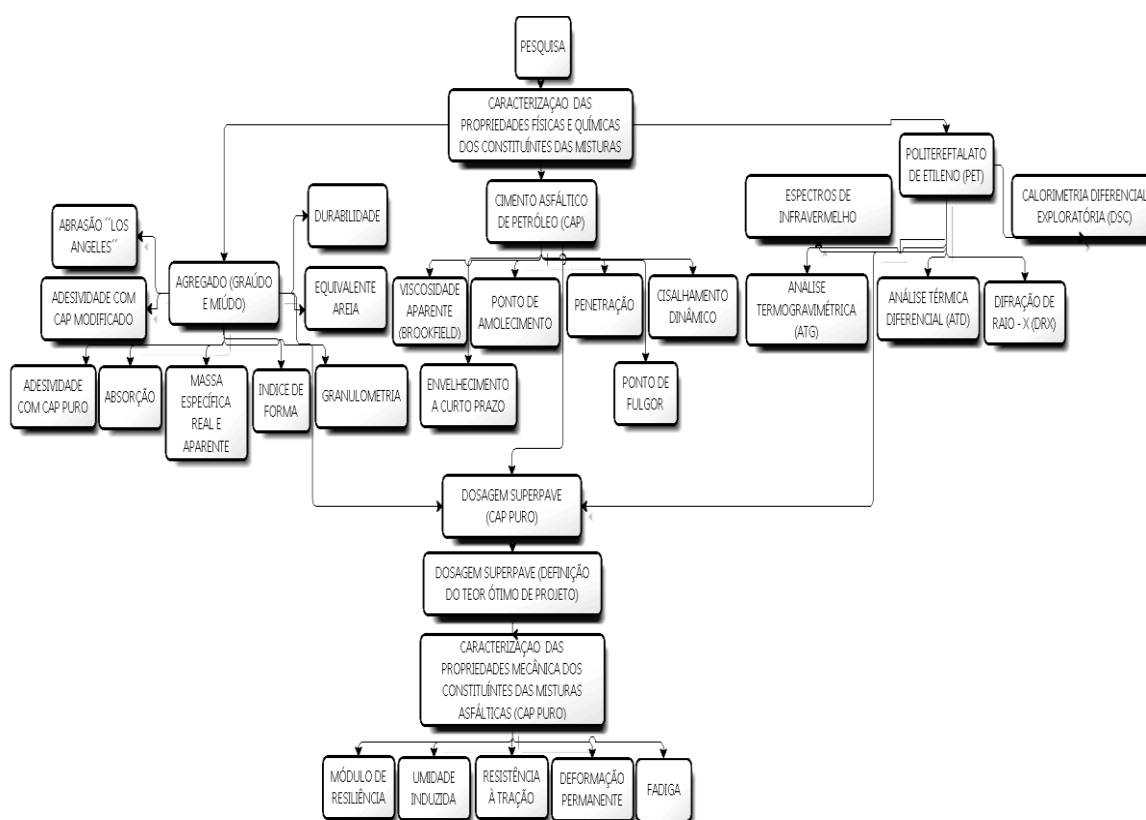
É condição “sine qua non” para um completo entendimento sobre a viabilidade de técnica do PET micronizado como agente modificador de Cimentos Asfálticos de Petróleo, a adoção de procedimentos e de equipamentos “racionais”, que nos últimos anos foram desenvolvidos e/ou adaptados no Programa SRHP para o estudo do comportamento reológico de CAPS e, por conseguinte o comportamento mecânico de Misturas Asfálticas, comportamentos estes inerentes e/ou relacionados a serventia e a vida útil dos revestimentos asfálticos utilizados em pavimentos flexíveis.

3 MATERIAS E MÉTODOS

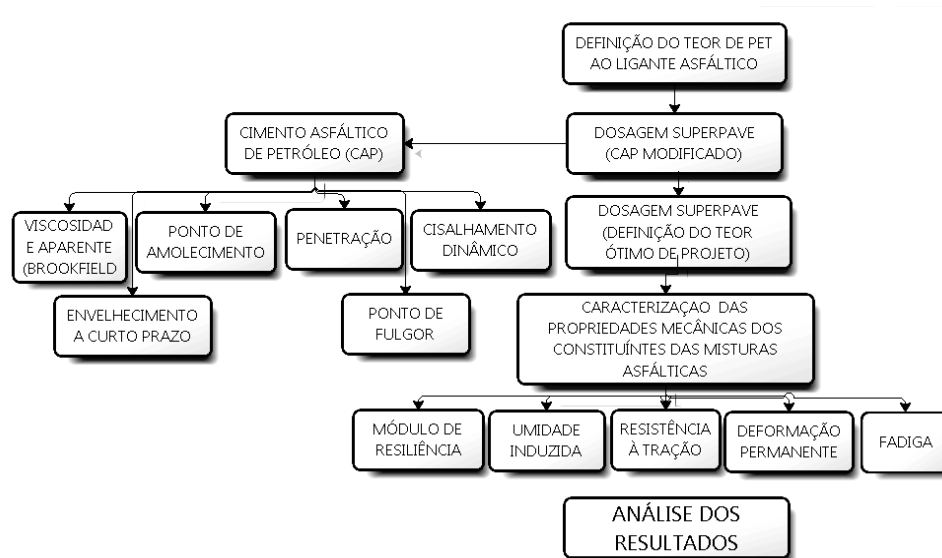
Neste Capítulo estão descritos os procedimentos adotados durante a fase experimental da pesquisa, relacionando aos aspectos inerentes pelos critérios adotados, materiais e especificações utilizadas para os estudos das propriedades químicas, físicas e mecânicas dos materiais e das misturas asfálticas utilizadas nesta pesquisa.

Os métodos de ensaios utilizados foram baseados em normas, entre elas, as da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), do Departamento de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT) e norma internacional da ASTM e da AASHTO. Os métodos não constantes nas normalizações foram descritos em suas especificidades. O Fluxograma 3.1 apresenta a seqüência de atividades desenvolvidas nesta pesquisa para a dosagem com CAP sem adição de PET, denominado doravante de *CAP Puro*. Em seguida foi realizado a adição de PET em proporções de 4%, 5% e 6% *relativas ao peso do teor de CAP ótimo* e mensuradas as propriedades volumétricas e mecânicas. Em função destes resultados foi estabelecido uma nova dosagem com o CAP com a adição de 5% de PET, denominada agora de *CAP Modificado*, e estabelecido o teor ótimo para estudos mecânicos conforme ilustrado no Fluxograma 3.2.

Fluxograma 3.1 - Seqüência de procedimentos da dosagem com CAP Puro.



Fluxograma 3.2 - Seqüência de procedimentos da dosagem com CAP Modificado.



3.1 Seleção dos materiais

Neste subitem são descritos os critérios e materiais que foram utilizados neste trabalho. Os métodos para escolha dos materiais estão baseados nas especificações e normas do DNIT, da ABNT, da ASTM e da AASHTO.

Agregados graúdos

Os agregados graúdos utilizados na pesquisa para a composição das misturas asfálticas foram do tipo agregado britado, de origem granítica proveniente da pedreira localizada próxima as margens da BR 101, e apresentaram diâmetro máximo de 25 mm, utilizados na região para revestimentos asfálticos (Figura 3.1). Além desse diâmetro, foram utilizados os tamanhos de 9,5 mm e 19,0 mm. Os materiais foram disponibilizados pelo 1º Grupamento de Engenharia do Exército Brasileiro.

Figura 3.1 - Agregados graúdos (a) brita 9,5mm; (b) brita 19,0mm (c) brita 25,0mm.



3.2 *Politereftalato de Etileno (PET)*

O polímero adicionado ao CAP foi do tipo micronizado classificado como um plastômero e denominado de PET. Este foi adquirido na indústria “De PET Reciclagem” localizada no município de Campina Grande – PB (Figura 3.2).

As propriedades do PET micronizado dependem da sua natureza química. O tamanho dos grânulos de PET micronizados utilizados como agregado para a preparação de misturas asfálticas foram entre 0,6 e 0,074 mm. Desse total, o passante na peneira de 0,074 mm foi de 4,06%.

A produção deste ocorre a partir de um procedimento físico onde navalhas são utilizadas em um equipamento com a finalidade de triturar as garrafas PET em pequenas partículas, processo denominado de micronização.

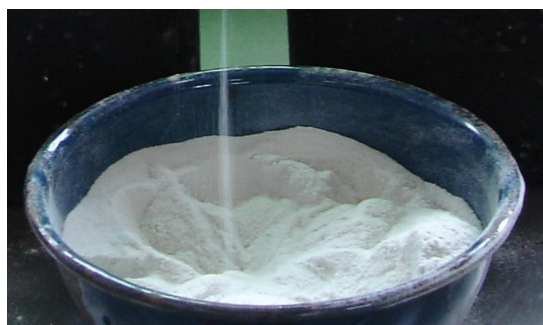
Figura 3.2 - (a) Indústria “De PET Reciclagem” (b) Microprocessador (c) Pet micronizado.



(a)



(b)



(c)

3.3 Cimento asfáltico de petróleo

O CAP utilizado na pesquisa foi do tipo 50/70 (Figura 3.3), fornecido pelo 1º Grupamento de Engenharia do Exército Brasileiro, cujas especificações estão de acordo com a Agência Nacional de Petróleo (ANP), a qual define os parâmetros de aceitação e classificação (Tabela 3.1).

Figura 3.3 - Amostra de CAP utilizada na pesquisa.

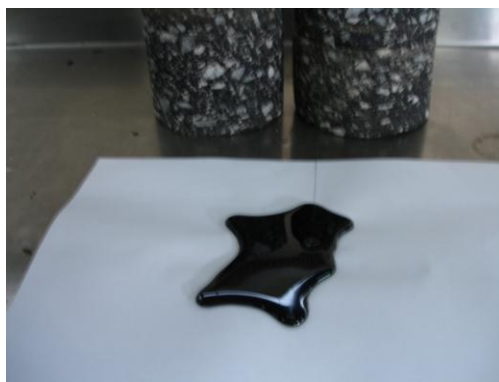


Tabela 3.1 - Propriedades físicas do CAP utilizado na pesquisa.

DESCRIÇÃO	RESULTADO	NORMA
Penetração 0,1mm (100g, 5s a 25°C)	52,90	NBR 6576
Ponto de Fulgor (°C)	320,00	NBR 5765
Densidade (g/cm³)	1,020	NBR 6568
Ponto de Amolecimento (°C)	39,60	NBR 6560
Viscosidade Saybolt Furol (s)	310 (à 135°C)	MB 326
	377,50 (à 135°C)	NBR 15184
Viscosidade Brookfield (cP)	187,00 (à 150°C)	NBR 15184
	68,50 (à 177°C)	NBR 15184

3.4 Envelhecimento a Curto Prazo

A estufa de película fina plana RTFO provoca o envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação e evaporação, permitindo avaliar a presença de frações de óleos mais leves e a oxidação que ocorre durante o aquecimento a 163 °C (Figura 3.4). Para esse ensaio foi utilizado a especificação da D 2872 – 97 da ASTM e da NBR 15235/2005 da ABNT para as amostras de CAP puro e modificado.

Figura 3.4 - Amostra de CAP utilizada na pesquisa.



3.5 Cal hidratada (Filer)

Para proporcionar um melhor desempenho às propriedades volumétricas e mecânicas das misturas asfálticas, obtendo um aumento da adesividade, menor susceptibilidade térmica e uma maior resistência à presença de água, foi utilizada a cal hidratada CH-I, da marca Megaó, como Filer, cujas especificações pode-se observar a partir da Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Propriedades da cal utilizada na pesquisa.

CAL HIDRATADA	
C_aO (%)	70 a 74
M_gO (%)	0,1 a 1,4
Insolúvel em HCL (%)	0,5 a 2,5
Perda ao Fogo (%)	23 a 27
$F_{e2}O_3 + Al_2O_3$ (%)	0,2 a 0,8
M_gO Não hidratada (%)	0,5 a 1,8

3.6 Propriedades químicas e físicas dos materiais

Agregados

O Fluxograma 3.3 apresenta a seqüência de ensaios realizados para a caracterização dos constituintes granulares das misturas asfálticas (Agregado). As normas adotadas para realização dos referidos ensaios são preconizadas a partir da metodologia apresentada na Tabela 3.3.

Fluxograma 3.3 - Seqüência de atividades para a caracterização dos agregados.

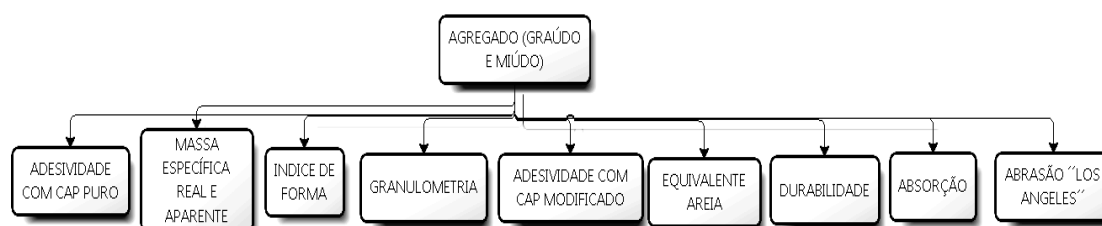


Tabela 3.3 - Normas utilizadas para a caracterização dos agregados e filer.

ENSAIOS	METODOLOGIA
Análise Granulométrica dos Agregados por Peneiramento	ME 083/98 do DNIT
Massa Específica Real dos Agregados e Filer	ME 195/97 do DNIT
Equivalente de Areia	ME 054/97 do DNIT
Desgaste Abrasão "Los Angeles"	ME 035/98 do DNIT
Absorção	ME 195/97 do DNIT
Adesividade	ME 078/94 do DNIT
Índice de Forma	ME 086/94 do DNIT
Durabilidade	ME 089/94 do DNIT

Cimento asfáltico de petróleo – CAP

O Fluxograma 3.4 ilustra a seqüência de ensaios utilizados para a caracterização do CAP. A caracterização química e física do CAP ocorreu conforme normas apresentadas na Tabela 3.4.

Fluxograma 3.4 - Seqüência de atividades para a caracterização do CAP.

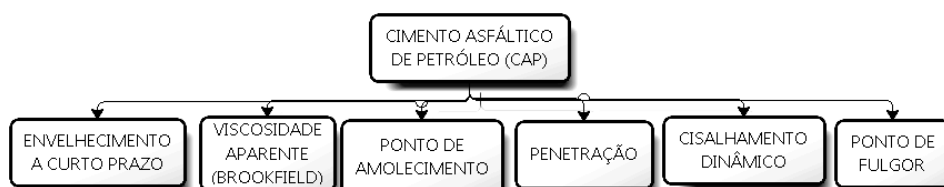


Tabela 3.4 - Normas utilizadas para os ensaios de caracterização do CAP.

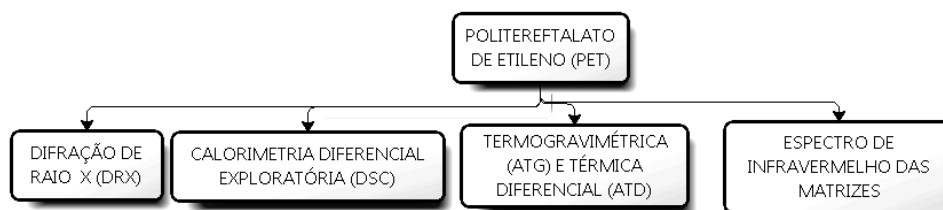
ENSAIOS	METODOLOGIA
Viscosidade Saybolt Furol	MB 517 da ABNT
Penetração	ME 003/99 do DNIT
Ponto de Fulgor	ME 148/94 do DNIT
Ponto de Amolecimento	ME 131/2010 do DNIT
Massa Específica	ME 117/94 do DNIT
Envelhecimento a Curto Prazo - RTFOT	D 2872-97 da ASTM
Envelhecimento a Longo Prazo - PAV	PP 2/94 da AASHTO
Viscosidade Aparente (Brookfield)	NBR 15184 da ABNT

Politereftalato de Etileno - PET

De acordo com o Fluxograma 3.5 pode-se observar a seqüência de ensaios utilizados para a caracterização do PET. A caracterização química e física do PET foi realizada segundo critérios preconizados por normas a partir da metodologia contida na D1921-9601 da ASTM. O procedimento de

micronização do PET foi físico, sem a presença de produtos químicos, por meio de micronarvalhas realizados na indústria.

Fluxograma 3.5 - Seqüência de análise para a caracterização do PET.



Difratograma de raios X do PET

As curvas de difração de Raios X foram as obtidas um Difratorômetro, marca Siemens, modelo D – 5000, na faixa de $2\theta = 10 - 75^\circ$, com um passo de $0,02^\circ$ e tempo de passo de 1,0 s, utilizando a radiação $K\alpha$ do cobre como fonte de radiação monocromática, incidência normal, à temperatura ambiente. A cristalinidade foi obtida no programa (PMGR) da Shimadzu cristalinity o qual é utilizado o *Coefficiente de Correção de Lorentz*. As análises de difração de raios-X foram realizadas no Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG (Figura 3.5).

Figura 3.5 - Difratorômetro: Laboratório de Caracterização de Materiais da - UFCG.



Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) é uma técnica que mede as temperaturas e o fluxo de calor associado com as transições dos materiais em função da temperatura e do tempo. Essa medida

informa, qualitativamente e quantitativamente sobre mudanças físicas e químicas que envolvem processos endotérmicos (absorção de calor), exotérmicos (liberação de calor) ou mudanças na capacidade calorífica.

As curvas DSC foram obtidas em um equipamento TA INSTRUMENTS, modelo DSC 2920 Modulated DSC, com o objetivo de se medir as transições entálpicas dos complexos, em atmosfera de nitrogênio com cadinho de alumina, fluxo de $50\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ e razão de aquecimento de $100\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, numa faixa de temperatura que varia da ambiente até $7000\text{ }^{\circ}\text{C}$. A massa utilizada foi em torno de 4.0 ± 0.5 gramas. Esta análise foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG (Figura 3.6).

Figura 3.6 - DSC 2920 Modulated: Laboratório de Caracterização de Materiais da - UFCG.



Termogravimetria (TG)/ Análise Térmica Diferencial (DTA)

As curvas TG/DTA foram obtidas em uma termo balança, marca SHIMADZU, modelo DTG-60H - Simultaneous DTA-TGA Apparatus, em atmosfera de nitrogênio com cadinho de alumina, fluxo de $50\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ e razão de aquecimento de $100\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, numa faixa de temperatura ambiente que varia de até 9000C . A massa utilizada será em torno de 4.0 ± 0.5 gramas.

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande / UFCG (Figura 3.7).

Figura 3.7 - DTG-60H/ DTA-TGA: Laboratório de Caracterização de Materiais da UFCG.



3.7 Ensaios reológicos do CAP Puro e Modificado

Os ensaios reológicos foram realizados com o Reômetro *Modelo DHR-1*, do Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG (Figura 3.8). O comportamento viscoelástico do CAP foi realizado por meio da aplicação de uma tensão de cisalhamento oscilatória com variação de frequência ou temperatura e determinados o Módulo Complexo G^* , o Módulo Elástico G' , Módulo Viscoso G'' , o ângulo de fase " δ " e a viscosidade. Os ensaios no DHR-1 foram realizados de acordo com a norma da ASTM D7175 – 08.

O ensaio de Fluência e Recuperação sob Tensão Múltipla (MSCR – *Multiple Stress Creep and Recovery*) é resultado do aperfeiçoamento do ensaio de Fluência Repetida e Recuperação (RCRT – *Repeated Creep and Recovery*) pela Administração Rodoviária Federal dos Estados Unidos (FHWA – *Federal Highway Administration*) e tem por objetivo avaliar o percentual de recuperação, a compliância não-recuperável e a dependência dos ligantes, especialmente os modificados, quanto ao nível de tensão com especificações empregada no procedimento da norma ASTM D7405.

Figura 3.8 - Reômetro *DHR-1* do LEP - UFCG.



Ensaio de Estabilidade a Estocagem

O ensaio de estabilidade a estocagem foi realizado segundo a norma ES 385/99 do DNIT com objetivo de determinar a viabilidade da utilização do PET na usina de asfalto quanto à homogeneidade da proporção da mistura asfáltica e verificação de provável separação de fases entre o CAP e os aditivos.

3.8 Dosagem das misturas asfálticas

Misturas asfálticas

Nesse trabalho, para compor as misturas asfálticas com o teor “ótimo” de CAP foram realizadas duas dosagens Superpave. A primeira foi realizada com o CAP Puro; e segunda com CAP Modificado com polímero (4%, 5% e 6% de PET micronizado).

O processo para adição do modificador PET ao CAP foi combinado a partir de técnicas de mistura com rotações de 2000 rpm sob temperatura de 165°C, e com um tempo de mistura de 2 horas, em um misturador de asfalto Modelo 722D com Capacidade para 3 litros, conforme seqüência apresentada no Fluxograma 3.6 e Figura 3.9.

No entanto, o PET tem alto ponto de fusão (aproximadamente 250°C), enquanto a temperatura máxima para o processo de (CAP + PET) deve ser inferior a 165 °C. O principal objetivo foi aproximar a homogeneização mantendo o PET durante o procedimento de mistura em seu estado natural, com alteração mínima ao seu formato e de suas propriedades.

Esses parâmetros foram definidos por condições limites da mistura entre o CAP e o PET micronizado (rotação, temperatura e tempo), que garantem que tenham uma maior homogeneização entre sua composição química, conhecida a dificuldade de mistura, por se tratar de uma fase heterogênea com uma fase líquida e uma sólida.

Fluxograma 3.6 - Seqüência da mistura (CAP+PET).

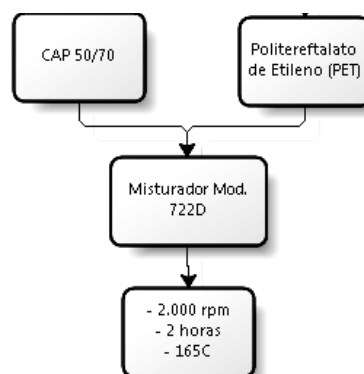


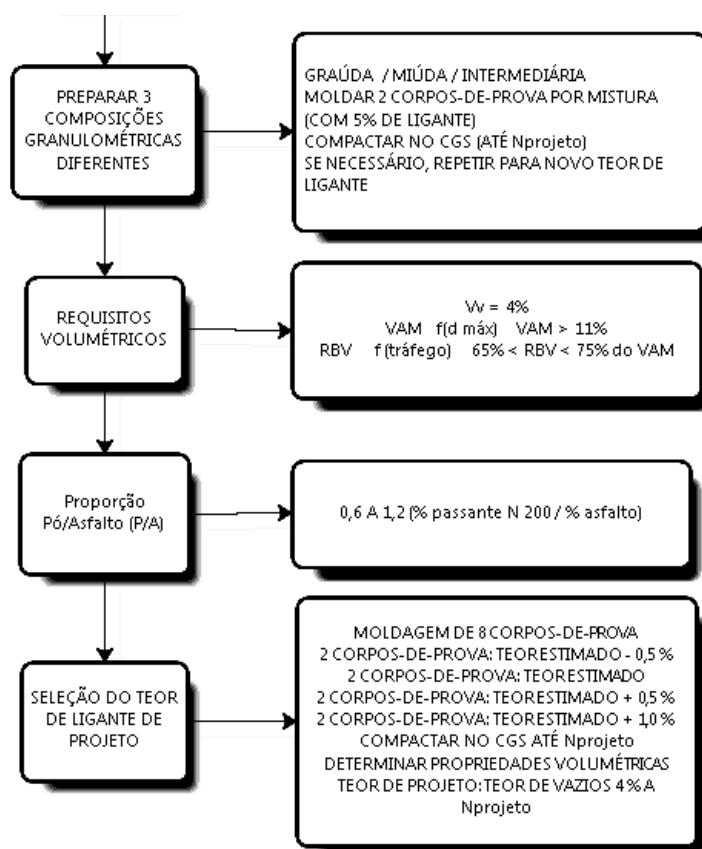
Figura 3.9 - Misturador de Cimentos Asfálticos Modelo 722D – LEP/UFCG.



De acordo com o Fluxograma 3.7 pode-se observar as etapas da dosagem Superpave para obtenção do teor “ótimo” de CAP de projeto realizada nessa pesquisa, e a partir do esboço do Fluxograma 3.6 está selecionada as fases da mistura do CAP com o PET.

A escolha dos teores de PET para esta pesquisa, seguiu Ahmadinia (2012), para a qual a quantidade apropriada de PET adicionada à mistura asfáltica fica entre 4% e 6%. Em geral, as propriedades das misturas asfálticas com adição de PET ao CAP mostram tendências aceitáveis nesses limites e satisfazem os requisitos da norma.

Fluxograma 3.7 - Seqüência de atividades para a Dosagem Superpave.



A compactação dos corpos de prova foi realizada segundo com o auxílio do Compactador Giratório (Superpave Giratory Compactor – SGC), de acordo os procedimentos da norma D 6925-08 da ASTM (Preparation and Determination of The Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of The Superpave Gyratory Compactor) O Equipamento utilizado foi SERVOPAC Gyratory Compactor da IPC Global do Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG (Figura 3.10 e Figura 3.11).

Figura 3.10 - Compactador Giratório (Superpave Gyratory Compactor – SGC) – LEP/UFCG.



Figura 3.11 - Corpos de prova compactados.



3.9 *Propriedades mecânicas das misturas asfálticas*

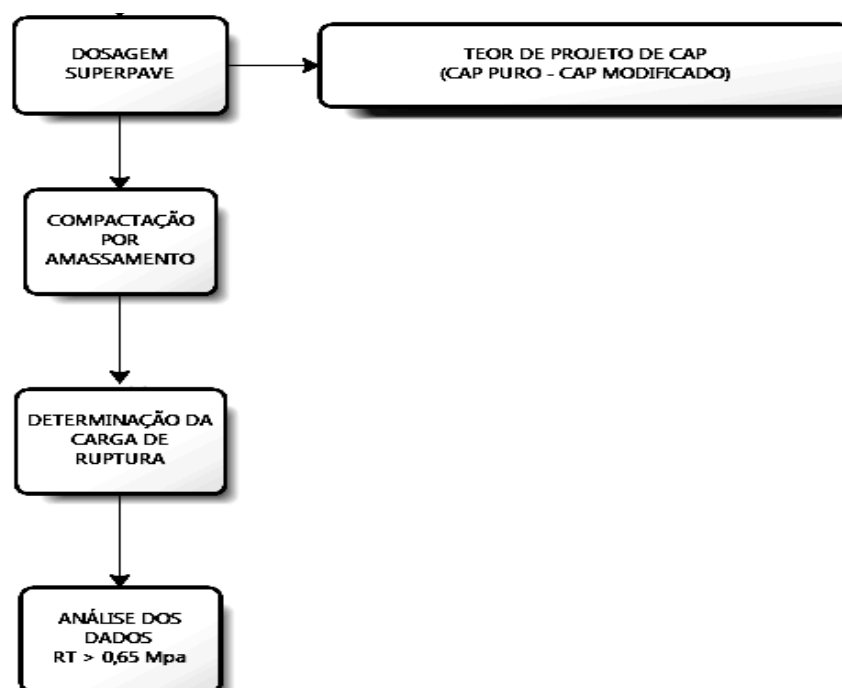
Esse tópico resume-se ao estudo das propriedades mecânicas das misturas asfálticas a partir do teor de projeto de CAP e dosado pelo procedimento de amassamento Superpave. Esta análise das misturas asfálticas puras e modificadas tem como base as propriedades de Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral (RT), de Resistência a Umidade Induzida, de Deformação Permanente, do Módulo de Resiliência, do *Flow Number* e de Fadiga.

Ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral (RT)

Nesta etapa foram moldados vinte e um (21) corpos de prova, correspondentes às Misturas Asfálticas: Mistura convencional (3 CPs), Mistura convencional com 4% de PET (3 CPs), Mistura convencional com 5% de PET (3 CPs), Mistura convencional com 6% de PET (3 CPs), Mistura Modificada com 5% de PET (3 CPs), compactadas por amassamento (SGC).

O ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral foi realizado segundo a Norma ME 136/10 do DNIT conforme é apresentado no Fluxograma 3.8.

Fluxograma 3.8 - Seqüência dos procedimentos do ensaio de Resistência à Tração.



Os corpos de prova foram preparados com o teor ótimo de asfalto e com o índice de vazios correspondentes aos obtidos pela Dosagem Superpave. Observar-se a partir da Figura 3.12 o equipamento utilizado nesse ensaio.

O primeiro conjunto de amostras à temperatura de equilíbrio de 25°C foi submetido ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT'). O segundo conjunto similar de amostras compactadas cilíndricas regulares, submetidas ao processo de saturação e "congelamento", foram igualmente submetidas ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) à temperatura de 25°C.

Figura 3.12 - Equipamentos utilizados para realização do ensaio de Resistência à Tração.



Ensaio de Resistência a Umidade Induzida

As amostras compactadas de misturas asfálticas, com teores de vazios pré estabelecidos, foram parcialmente saturadas com água e submetidas a baixas temperaturas, que refletissem as que ocorrem na região mais fria do Nordeste, durante um período de tempo de 18 horas. Esta presença de água na mistura asfáltica tem como função simular as tensões internas induzidas por cargas do tráfego.

Considerou-se que, para a Região Nordeste, dificilmente a temperatura dos revestimentos asfálticos pode apresentar valores inferiores a dezoito graus Célsius negativo (-18°C), valor estabelecido pela a Norma D 4867 da ASTM quando simula a perda de resistência por umidade induzida. Com isso, foram moldados corpos de prova e submetidos ao condicionamento, de ciclo de resfriamento, com a temperatura do revestimento estimada em dez (10) graus Celsius (10°C) que corresponde à mínima atingida para a região Nordeste em Geral (Figura 3.13).

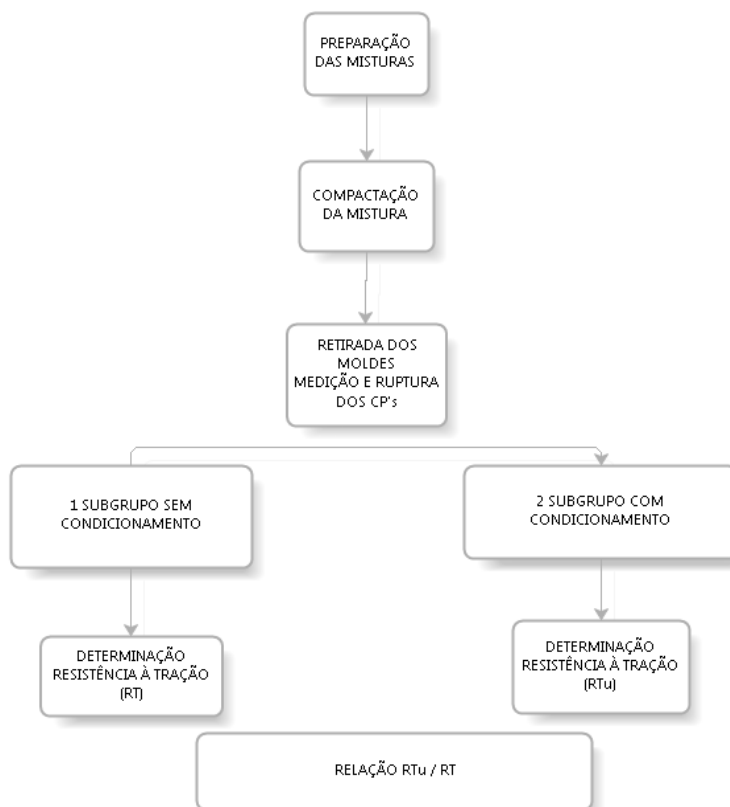
O ensaio de Umidade Induzida foi realizado segundo a Norma do DNIT ME 136/10 e a Norma da AASHTO T 283-02, com o auxílio da prensa Marshall e do pórtico de Lobo Carneiro. Observar-se a partir do Fluxograma 3.9 a seqüência de forma simplificada dos procedimentos utilizados para a realização no ensaio de Resistência a Umidade Induzida. Este é obtido pela relação de dois grupos de amostras, sendo um submetido ao condicionamento e o outro não.

A relação entre as resistências à tração antes e após a indução do dano por umidade deve ser maior ou igual a 0,70 (AASHTO) e 0,80 pelo o procedimento Superpave, ou seja, a perda de resistência não deverá ser superior a 30% e 20%, respectivamente.

Figura 3.13 - Equipamentos utilizados do ensaio de Resistência a Umidade Induzida.



Fluxograma 3.9 - Procedimentos do ensaio de Resistência a Umidade Induzida



Nesta etapa foram moldados vinte e um (21) corpos de prova, correspondentes às Misturas Asfálticas: Mistura Convencional (3 CPs), Mistura com 4% de PET (3 CPs), Mistura com 5% de PET (3 CPs), Mistura com 6% de PET (3 CPs), Mistura Modificada com 4% de PET (3 CPs), Mistura Modificada com 5% de PET (3 CPs), Mistura Modificada com 6% de PET (3 CPs), compactadas por amassamento (SGC).

Ensaio de Módulo de Resiliência

O ensaio de Módulo de Resiliência foi realizado de acordo com as Normas ASTM e do DNIT D 4123-82 e ME - 133/94, respectivamente, com temperaturas controladas de 5 °C, 25 °C e 40 °C. De acordo com a Figura 3.14, pode-se observar as fotos dos equipamentos que foram utilizados para a realização dos ensaios.

Figura 3.14 - Equipamentos utilizados para o ensaio de Módulo de Resiliência.

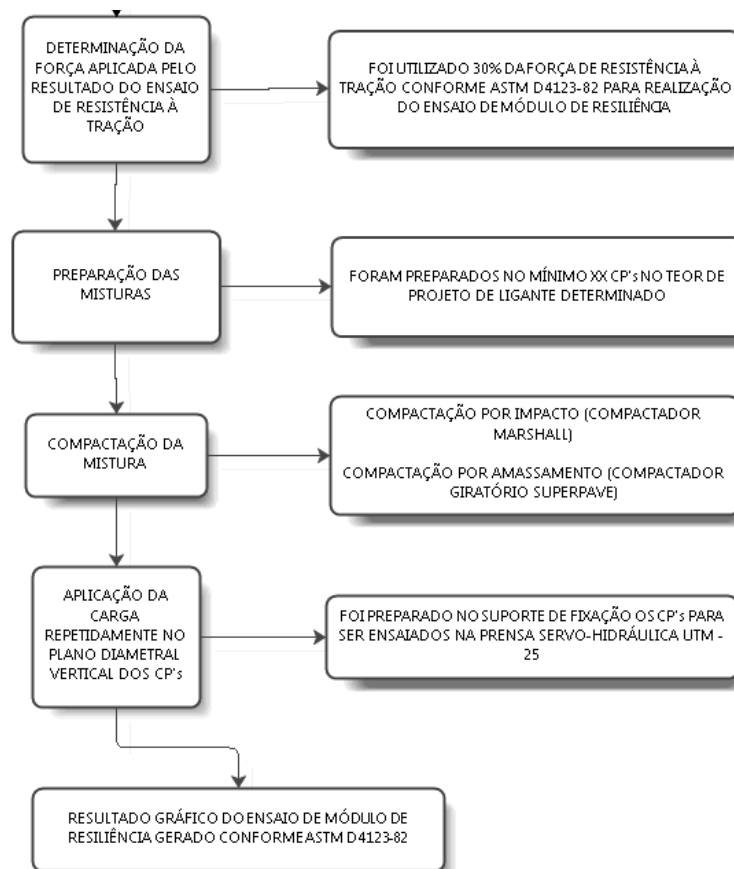


Fonte: Fotos da Pesquisa.

A força utilizada para o ensaio de Módulo de Resiliência foi correspondente a 10% da Resistência à Tração para cada Mistura Asfáltica com seu respectivo teor de CAP de projeto, conforme os ciclos de condicionamento. Os procedimentos estão esquematizados na seqüência do ensaio contido no Fluxograma 3.10.

Nesta etapa foram moldados vinte e sete (27) corpos de prova, correspondentes às Misturas Asfálticas: Mistura Convencional (3 CPs), Mistura com 4% de PET (3 CPs), Mistura com 5% de PET (3 CPs), Mistura com 6% de PET (3 CPs), Mistura Modificada com 4% de PET (3 CPs), Mistura Modificada com 5% de PET (3 CPs), Mistura Modificada com 6% de PET (3 CPs), compactadas por amassamento (SGC).

Fluxograma 3.10 - Procedimentos utilizados para o ensaio de Módulo de Resiliência.



Fonte: Elaboração Própria.

Os ensaios foram realizados com a aplicação de cargas repetidas num intervalo de 0,1 s, e repouso de 0,9 s, no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico. Essa carga gerou uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação da carga, e medidores LVDT foram utilizados para medir o deslocamento diametral recuperável na direção correspondente à tensão gerada (deslocamento horizontal). Esta frequência de aplicação de carga visa simular o efeito do tráfego de veículos.

Ruptura por Fadiga

O ensaio de Fadiga por tensão controlada foi realizado na prensa UTM 25, mesmo equipamento utilizado para o ensaio de Módulo de Resiliência, conforme mostrado na Figura 3.14. O Fluxograma 3.11 mostra a sequência dos procedimentos utilizados nesse ensaio.

A frequência de pulso aplicada foi de 1 Hz sendo 0,1s para a aplicação de carga senoidal e 0,9s de repouso. O critério de parada adotado foi de deformação axial de 1 mm. O ensaio de Fadiga foi

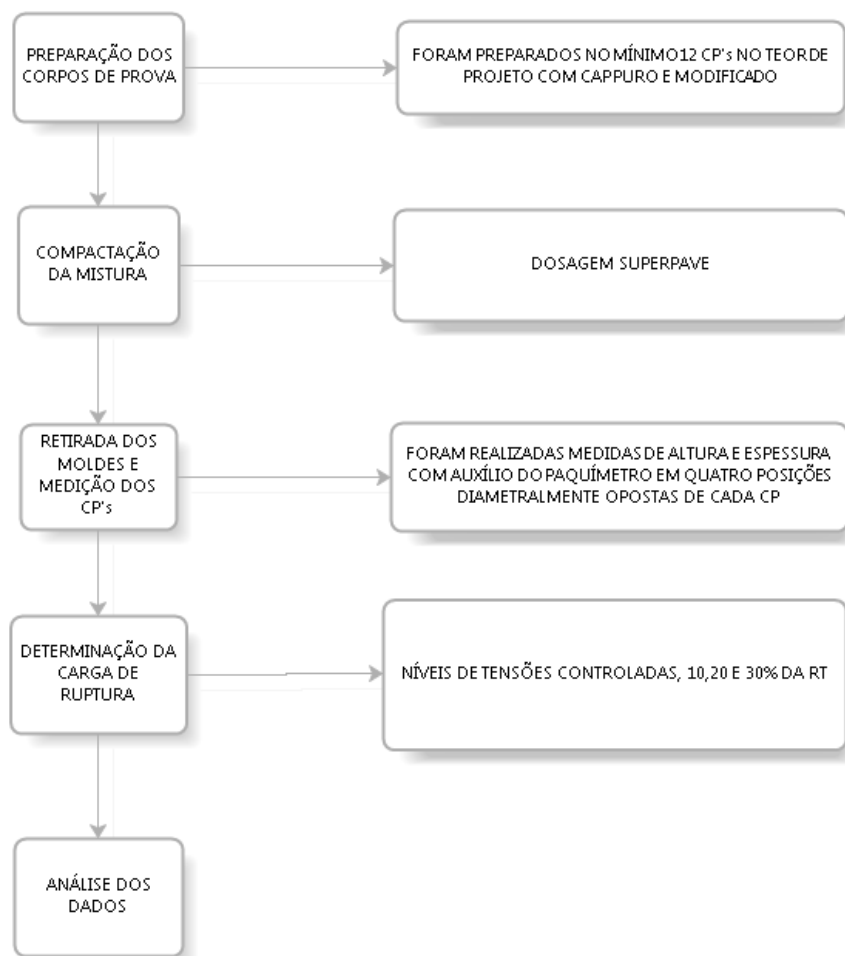
realizado a temperatura controlada de 25 °C com os corpos de prova alocados em uma câmara de controle de temperatura.

Para esse ensaio foram selecionados 3 níveis de tensão, 10%, 20% e 30%, sendo que esses níveis foram definidos após resultados da Resistência à Tração por Compressão Diâmetral.

O ensaio de Fadiga diâmetral foi realizado com corpos de provas cilíndricos provenientes da dosagem SUPERPAVE, moldados no teor ótimo de projeto com CAP Puro e com CAP Modificado com adição de 5% de PET e teve como critério de parada a deformação de 1mm ou 10.000 ciclos.

Como ainda não há método oficial preconizado no Brasil, o ensaio foi realizado com base na vasta literatura nacional, especialmente na experiência de outros centros de pesquisa, como a USP e a COPPE/UFRJ.

Fluxograma 3.11 - Procedimentos utilizados para a realização do ensaio de Fadiga.



Fonte: Elaboração Própria.

Ensaio de Deformação pelo critério diametral (Flow Number).

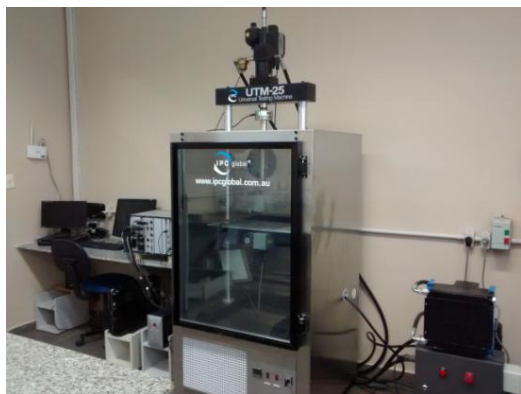
O ensaio de “*Flow Number*” foi realizado com corpos de provas cilíndricos provenientes da dosagem SUPERPAVE, moldados no teor ótimo de projeto com CAP Puro e com CAP Modificado com adição de 5% de PET.

Os ensaios de Deformação pelo Critério Diametral (Flow Number) foram obtido por meio do carregamento uniaxial de cargas repetidas e realizados por meio da aplicação de deformação controlada a partir de uma carga de compressão em amostras cilíndricas com 100 mm de diâmetro e 65 mm de altura.

No ensaio, a carga compressiva é aplicada com um tempo de carregamento de 0,1 segundos e com repouso de 0,9 segundos, até ser atingido um máximo de 10.000 ciclos ou até uma deformação de 50.000 microstrains.

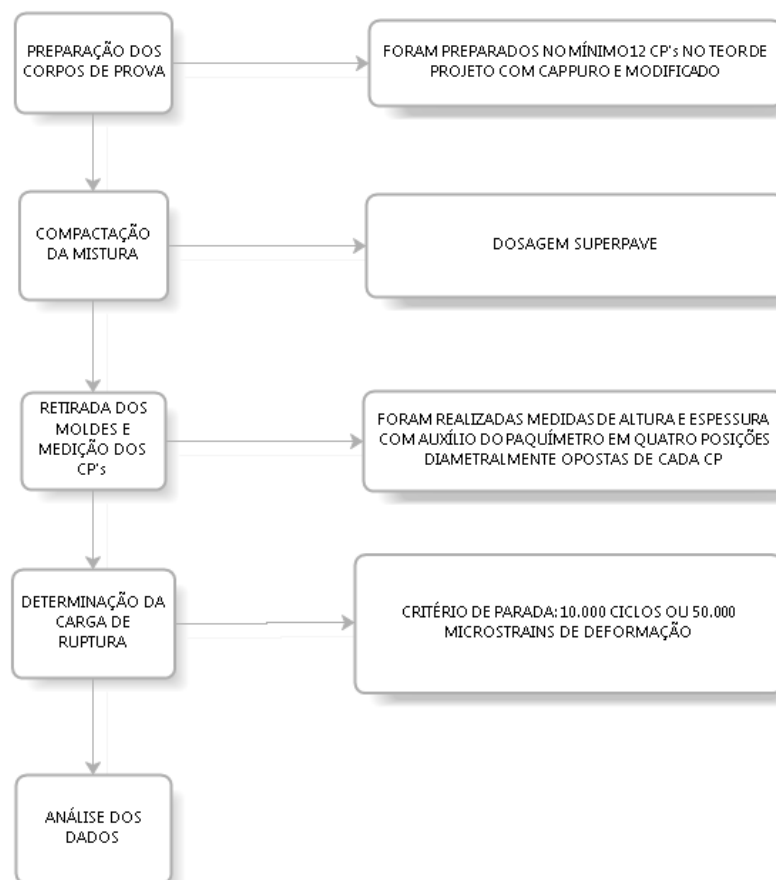
Uma tensão de 600 kPa é aplicada à amostra até que o ponto de fluxo seja atingido. Esse ponto representa o máximo de deformação da amostra. O ensaio é executados em uma temperatura de 60°C. Por meio da Figura 3.15 e do Fluxograma 3.12 pode-se observar, respectivamente, os equipamentos utilizados (UTM 25 e suporte para o ensaio de Flow Number) e os procedimentos principais para a realização dos ensaios.

Figura 3.15 - Equipamentos utilizados para realização do ensaio de Flow Number.



Fonte: Fotos da Pesquisa.

Fluxograma 3.12 - Procedimentos utilizados para a realização do ensaio de Flow Number.



Fonte: Elaboração Própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste Capítulo são discutidos os resultados das propriedades químicas, físicas e mecânicas dos materiais e das misturas asfálticas estudadas.

4.1 *Propriedades dos constituintes das misturas asfálticas.*

Equivalente de Areia

Conforme norma do DNIT, para que um agregado miúdo possa ser utilizado em concreto asfáltico, o equivalente de areia deve ser de pelo menos 55%, o que se verificou na areia e no pó de pedra utilizados nesta pesquisa, que resultaram, respectivamente, em 80,96% e 64,90%.

Massa Específica Real e Aparente

Nas Tabelas 4.1 e 4.2 estão inseridos as massas específicas reais e aparentes dos agregados graúdos e miúdos, areia e pó de pedra, que foram utilizados nas composições das misturas asfálticas estudadas.

Tabela 4.1 - Massas Específicas real e aparente dos agregados graúdos.

<i>D (mm)</i>	<i>Massa Específico Real (g/cm³)</i>	<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>
25,4	2,742	2,719
19,4	2,747	2,719
12,5	2,755	2,722

Tabela 4.2 - Massas Específicas real dos agregados miúdos.

<i>D (mm)</i>	<i>Massa Específica Real (g/cm³)</i>	<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>
Areia	2,543	2,540
Pó de Pedra	2,435	2,430

Estes resultados foram utilizados para as determinações das propriedades de estado (volumetria) das misturas, tais como: Densidade Máxima Teórica (DMT); Volume de Vazios (VV), Relação

Betume Vazios (RBV), etc. Os resultados do ensaio de absorção dos agregados graúdos estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Resultado do ensaio de absorção em água (ME 081/98 do DNIT).

D (mm)	Resultado (%)
25,1	0,32
19,4	0,39
12,7	0,45
Areia	0,04
Pó de Pedra	0,08

Conforme se observa na Tabela 4.3, os agregados apresentaram baixa absorção inferior a 0,50%, característica de agregados de porosidade baixa, o que faz indicar que esta propriedade incrementa a estimativa do teor de projeto das misturas asfálticas, diminuindo o teor de ligante.

Abrasão “Los Angeles”

Os valores obtidos para os desgastes por Abrasão “Los Angeles” foram 36,1%, 34,3% e 23,0 %, respectivamente, para os agregados de Diâmetro Nominal Máximo de 25,4, 19,4 e 12,5 mm. Estes valores encontram-se dentro do máximo preconizado pela Norma brasileira (ME 035/98 do DNIT) para os serviços de pavimentação, cujo valor deve ser menor que 50%, portanto, compatível para a utilização em misturas asfálticas.

Formas das Partículas

Partículas irregulares, ou de forma angular, tais como pedra britada, cascalho e algumas areias de brita tendem a apresentar melhor intertravamento entre os grãos compactados, tanto maior quanto mais cúbicas forem as partículas e mais afiadas forem suas arestas.

A forma das partículas é caracterizada pela determinação do índice de forma (f) em ensaio descrito no método ME 086/94 do DNIT. Esse índice varia de 0,00 a 1,00, sendo o agregado considerado

de ótica cubicidade quando $f=1,00$ e lamelar quando $f=0,00$. Os valores do ensaio de índice de forma das partículas dos agregados graúdos estão mostrados na Tabela 4.4 de onde se observa que o limite mínimo de $f=0,5$ foi atingido para aceitação dos agregados quando à forma.

Tabela 4.4 - Resultado do ensaio de Índice de Forma.

<i>D (mm)</i>	<i>Resultado (%)</i>
25,1	0,90
19,4	0,85
12,7	0,73

Conforme se pode observar nos valores da Tabela 4.4, os agregados utilizados nessa pesquisa apresentaram boa “cubicidade”. A distribuição granulométrica dos agregados que compõem uma mistura asfáltica com diâmetro máximo de 25 mm se enquadrou nas especificações da Faixa B do DNIT. Trata-se de uma faixa mais aberta que agregará uma mistura asfáltica com maior rigidez quando adicionado o PET.

Na Tabela 4.5 e na Figura 4.1 estão apresentados os resultados da distribuição dos tamanhos das partículas dos agregados (valores e curvas lançadas em gráfico).

A partir dos resultados apresentados foram estabelecidas as proporções dos agregados graúdos e miúdos, de acordo com as especificações da Faixa granulométrica “B” preconizadas pelo DNIT, para a obtenção do teor ótimo de asfalto pelo procedimento Superpave.

Em gráfico foram lançadas, as distribuições dos tamanhos das partículas para as composições calculadas e obtidas após o peneiramento denominadas de Teóricas e de Reais, respectivamente, inerentes aos Limites Inferior, Intermediário e Superior da Faixa B do DNIT na ordem de citação. (Tabela 4.6 a Tabela 4.8 e Figura 4.2 a Figura 4.7).

Tabela 4.5 - Percentual passante da distribuição das partículas dos agregados.

Diâmetro	Percentagem Passante (%)						
	Brita 25 mm	Brita 19 mm	Brita 12.5 mm	Areia	Pó de Pedra	Filler	Pet
1 ½"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	99,75	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
¾"	58,85	93,93	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
½"	5,41	35,27	95,07	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	1,30	7,37	62,12	99,86	96,97	100,00	100,00
Nº 4	0,84	0,77	5,84	99,46	83,45	100,00	100,00
Nº 10	0,82	0,62	2,39	96,11	58,60	100,00	99,94
Nº 40	0,75	0,51	1,59	68,80	31,72	100,00	98,97
Nº 80	0,60	0,38	1,12	18,68	16,76	100,00	9,83
Nº 200	0,39	0,25	0,71	4,08	7,33	97,00	4,06

Figura 4.1 - Curva granulométrica dos constituintes da mistura asfáltica (Agregado + PET)

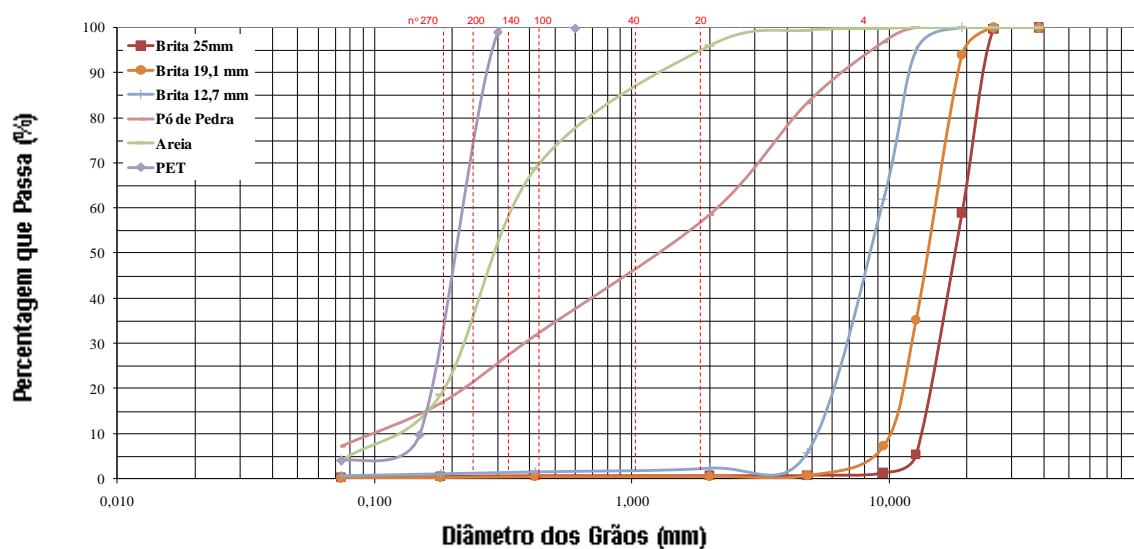


Tabela 4.6 - Composição dos agregados do limite inferior [Faixa B do DNIT].

PENEIRAS	PORCENTAGEM PASSANDO - MISTURA DE PROJETO INFERIOR 3I						PROJETO	ESPECIFICAÇÃO	
	BRITA 25 (%)	BRITA 19 (%)	BRITA 12.5 (%)	AREIA (%)	PÓ DE PEDRA (%)	FILLER (%)		Faixa B	
	20%	20%	29%	4%	25,0%	2%			
1 1/2"	20,00	20,00	29,00	4,00	25,00	2,00	100,00	100	100
1"	19,95	20,00	29,00	4,00	25,00	2,00	99,95	95	100
3/4"	11,77	18,79	29,00	4,00	25,00	2,00	90,56	80	100
1/2"	1,08	7,05	27,57	4,00	25,00	2,00	66,71		
3/8"	0,26	1,47	18,01	3,99	24,24	2,00	49,99	45	80
Nº 4	0,17	0,15	1,69	3,98	20,86	2,00	28,86	28	60
Nº 10	0,16	0,12	0,69	3,84	14,65	2,00	21,48	20	45
Nº 40	0,15	0,10	0,46	2,75	7,93	2,00	13,40	10	32
Nº 80	0,12	0,08	0,32	0,75	4,19	2,00	7,46	8	20
Nº 200	0,08	0,05	0,21	0,16	1,83	1,94	4,27	3	8

Figura 4.2 - Curva de Fuller [Limite inferior da faixa B do DNIT].

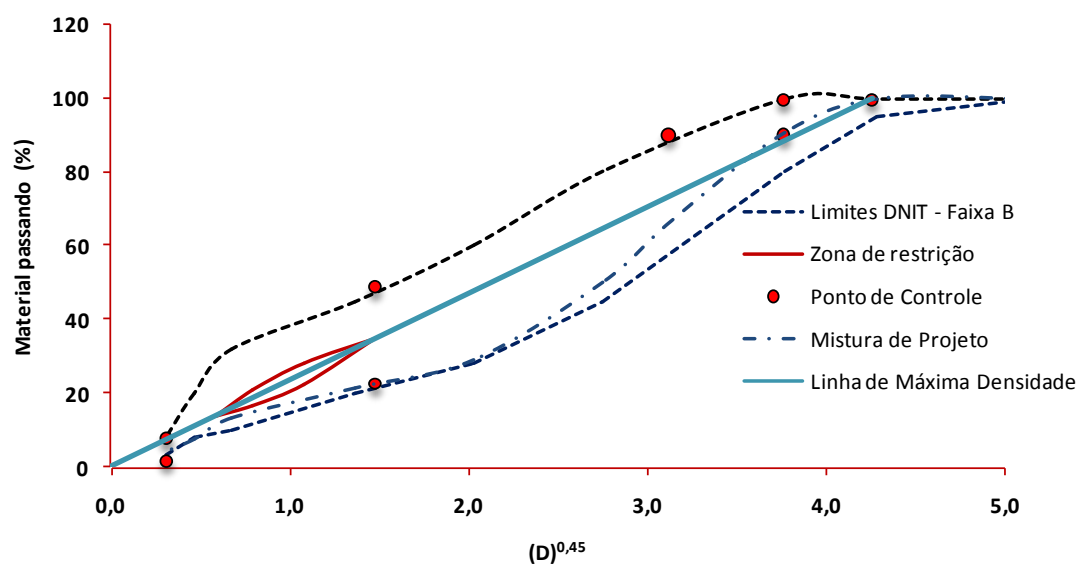


Figura 4.3 - Curva de projeto teórica e real [Limite inferior da faixa B do DNIT].

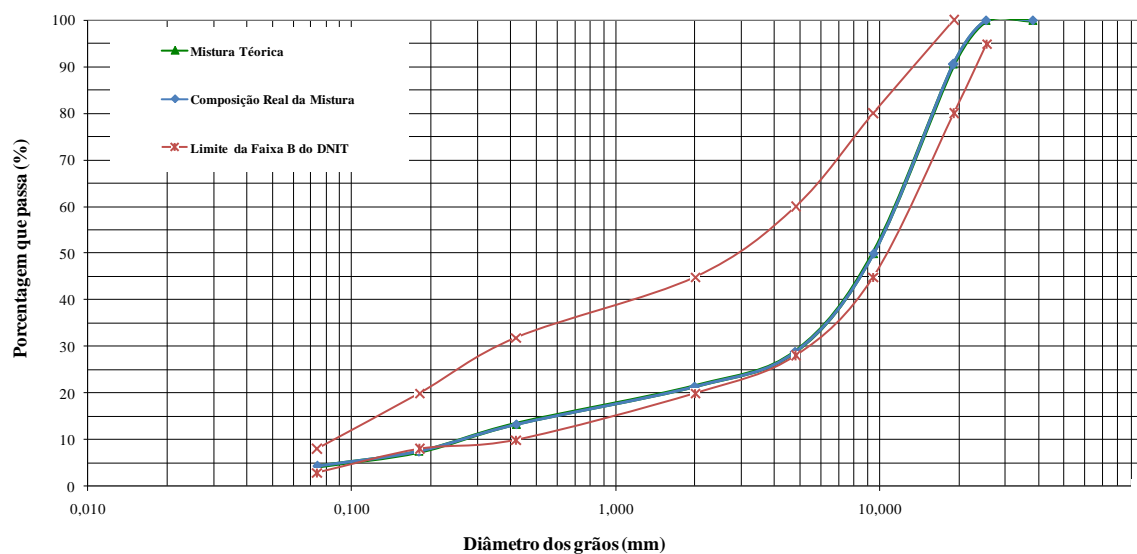


Tabela 4.7 - Composição dos agregados do limite intermediário [Faixa B do DNIT].

PENEIRAS	PORCENTAGEM PASSANDO - MISTURA DE PROJETO INTERMEDIÁRIA 2M						PROJETO	ESPECIFICAÇÃO	
	BRITA 25 (%)	BRITA 19 (%)	BRITA 12.5 (%)	AREIA (%)	PÓ DE PEDRA (%)	FILLER (%)		Faixa B	
	10%	13%	30%	15%	30,0%	2%			
1 1/2"	10,00	13,00	30,00	15,00	30,00	2,00	100,00	100	100
1"	9,97	13,00	30,00	15,00	30,00	2,00	99,97	95	100
3/4"	5,89	12,21	30,00	15,00	30,00	2,00	95,10	80	100
1/2"	0,54	4,59	28,52	15,00	30,00	2,00	80,65		
3/8"	0,13	0,96	18,64	14,98	29,09	2,00	65,79	45	80
Nº 4	0,08	0,10	1,75	14,92	25,04	2,00	43,89	28	60
Nº 10	0,08	0,08	0,72	14,42	17,58	2,00	34,88	20	45
Nº 40	0,08	0,07	0,48	10,32	9,52	2,00	22,45	10	32
Nº 80	0,06	0,05	0,34	2,80	5,03	2,00	10,28	8	20
Nº 200	0,04	0,03	0,21	0,61	2,20	1,94	5,04	3	8

Figura 4.4 - Curva de Fuller [Limite intermediário da faixa B do DNIT].

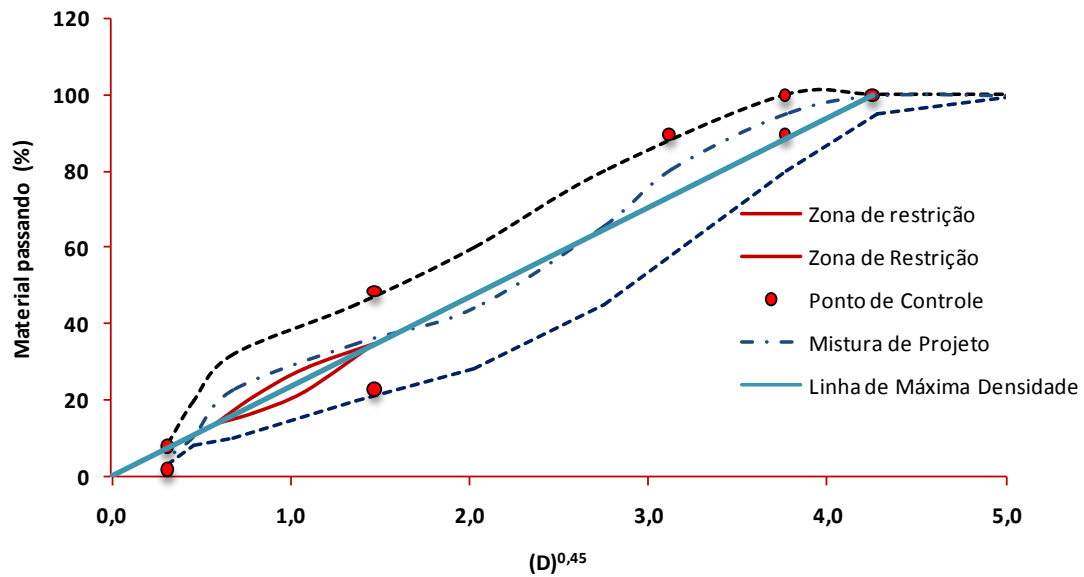


Figura 4.5 - Curva de projeto teórica e real [Limite intermediário da Faixa B do DNIT].

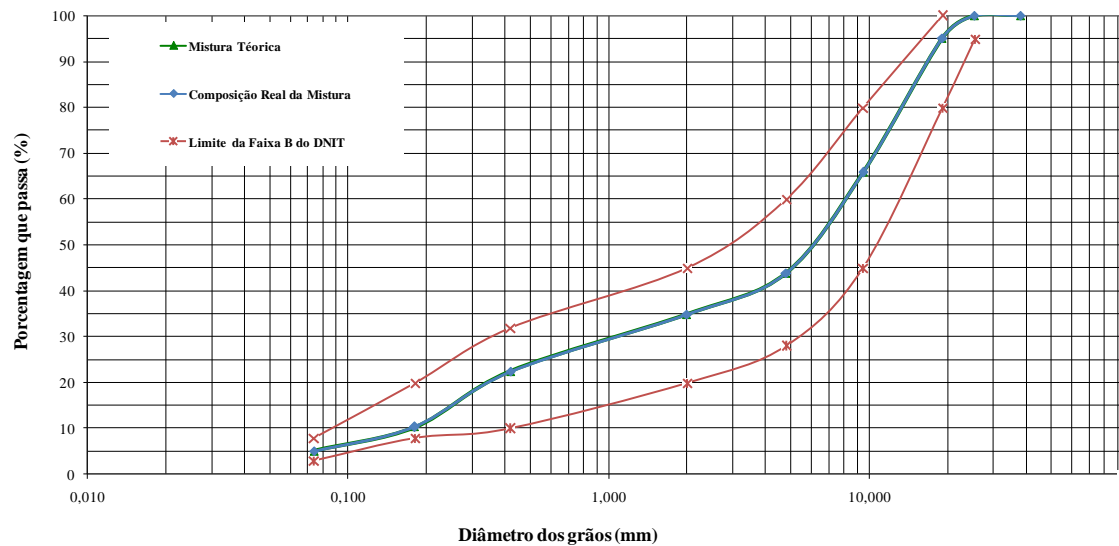


Tabela 4.8 - Composição dos agregados do limite superior [Faixa B do DNIT].

PENEIRAS	PORCENTAGEM PASSANDO - MISTURA DE PROJETO SUPERIOR 1S						ESPECIFICAÇÃO		
	BRITA 25 (%)	BRITA 19 (%)	BRITA 12.5 (%)	AREIA (%)	PÓ DE PEDRA (%)	FILLER (%)	PROJETO		
	3%	11%	28%	27%	29,0%	2%	Faixa B		
1 1/2"	3,00	11,00	28,00	27,00	29,00	2,00	100,00	100	100
1"	2,99	11,00	28,00	27,00	29,00	2,00	99,99	95	100
3/4"	1,77	10,33	28,00	27,00	29,00	2,00	98,10	80	100
1/2"	0,16	3,88	26,62	27,00	29,00	2,00	88,66		
3/8"	0,04	0,81	17,39	26,96	28,12	2,00	75,33	45	80
Nº 4	0,03	0,08	1,64	26,85	24,20	2,00	54,80	28	60
Nº 10	0,02	0,07	0,67	25,95	16,99	2,00	45,71	20	45
Nº 40	0,02	0,06	0,45	18,58	9,20	2,00	30,30	10	32
Nº 80	0,02	0,04	0,31	5,04	4,86	2,00	12,28	8	20
Nº 200	0,01	0,03	0,20	1,10	2,13	1,94	5,41	3	8

Figura 4.6 - Curva de Fuller [Limite superior Faixa B do DNIT]

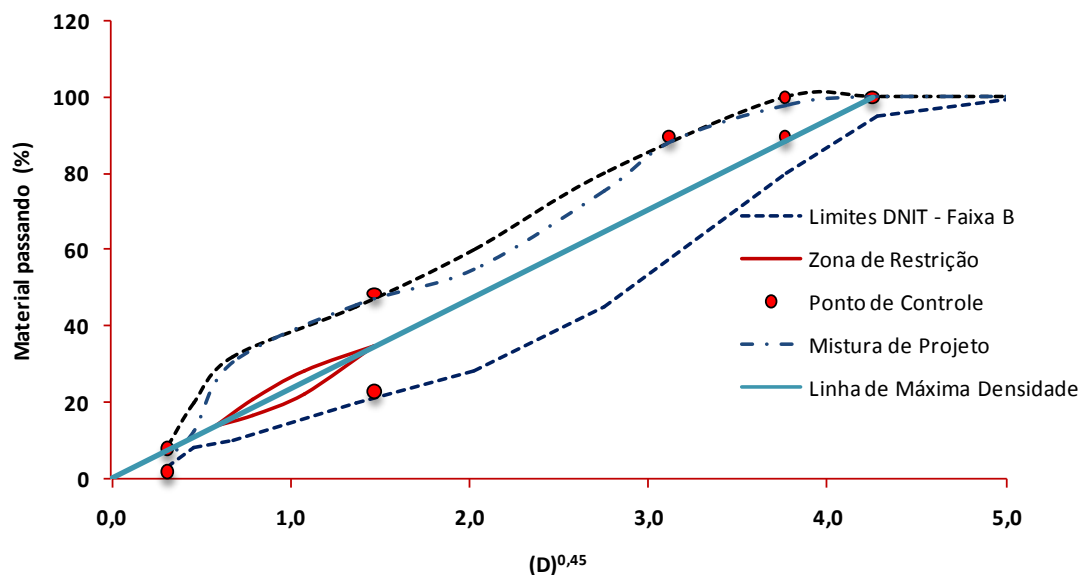
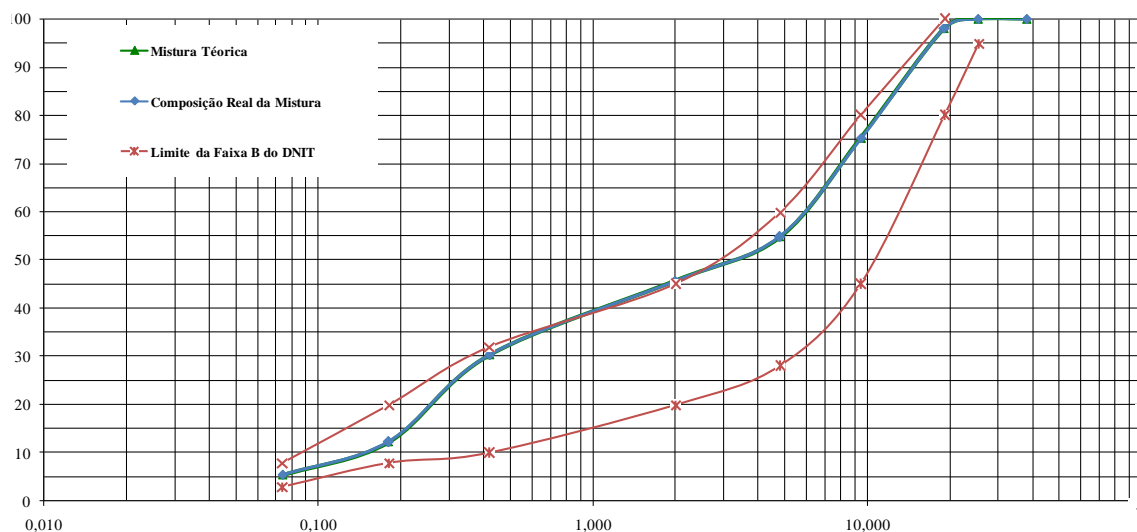


Figura 4.7 - Curva de projeto teórica e real [Limite superior da faixa B do DNIT].

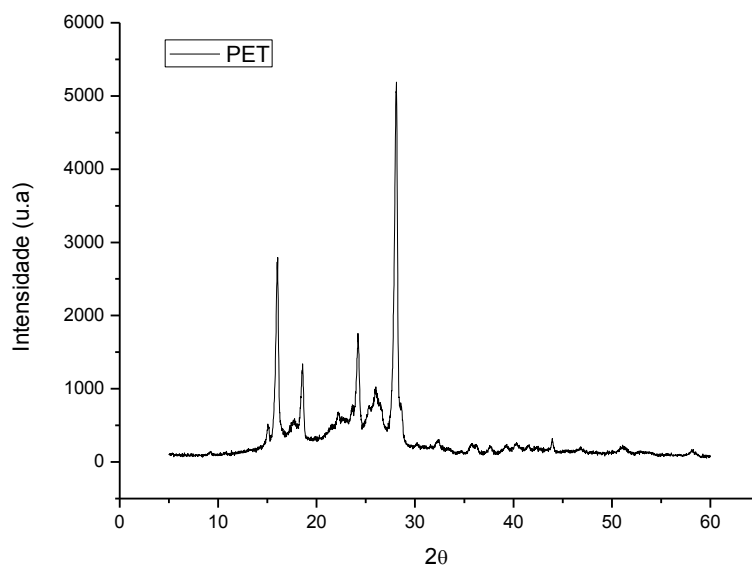


4.2 Propriedades dos constituintes do PET.

Difratogramas de Raios X do PET micronizado pós consumo

O PET micronizado é caracterizado pela cor branca típico de materiais cristalinos . A Figura 4.8 apresenta os resultados do ensaio do Difratograma de Raios X do PET pós consumo.

Figura 4.8 - DRX para o PET micronizado pós consumo.

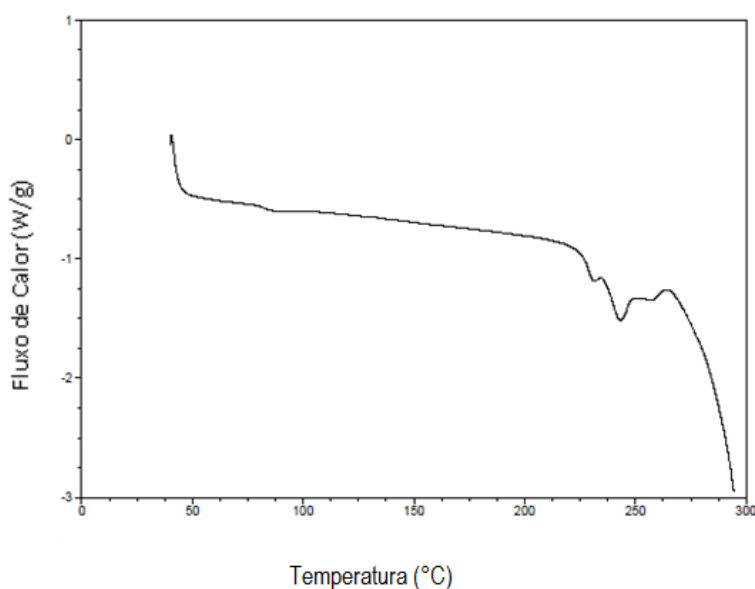


Observa-se da Figura 4.8 semelhança na curva de difração de Raios X do resultado da pesquisa com as obtidas por Vanini, em 2010, apresentados na Figura 2.9. Observa-se no gráfico uma ordenação cristalina na estrutura do PET micronizado. Essa estrutura é típica para o PET pós consumo, pois conforme apresentado na fundamentação teórica desse estudo, nessa fase o PET apresenta uma estrutura cristalina. Esse resultado confere ao PET micronizado pós consumo a presença de traços de impurezas presentes no produto.

Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

O gráfico obtido do ensaio de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) realizado com o PET micronizado pós consumo está mostrado na Figura 4.9.

Figura 4.9 - DSC para o PET micronizado pós consumo.



De acordo com o gráfico do DSC do PET, pode-se analisar que as mudanças químicas na cadeia polimérica do PET ocorrem para temperaturas acima de 200 °C, ou seja, fora do intervalo de temperatura da adição do polímero às misturas asfálticas, que é no máximo, 165 °C. Tais condições garantem que durante o processo de mistura o PET mantém suas propriedades originais. Este resultado confirma o obtido por Rabello (2008) conforme mostrado na Figura 2.10. Para o presente caso, as alterações químicas no fluxo de calor do PET ocorreriam a partir da temperatura de 250 °C, aproximadamente.

Termogravimetria (TG)/ Análise Térmica Diferencial (ATD).

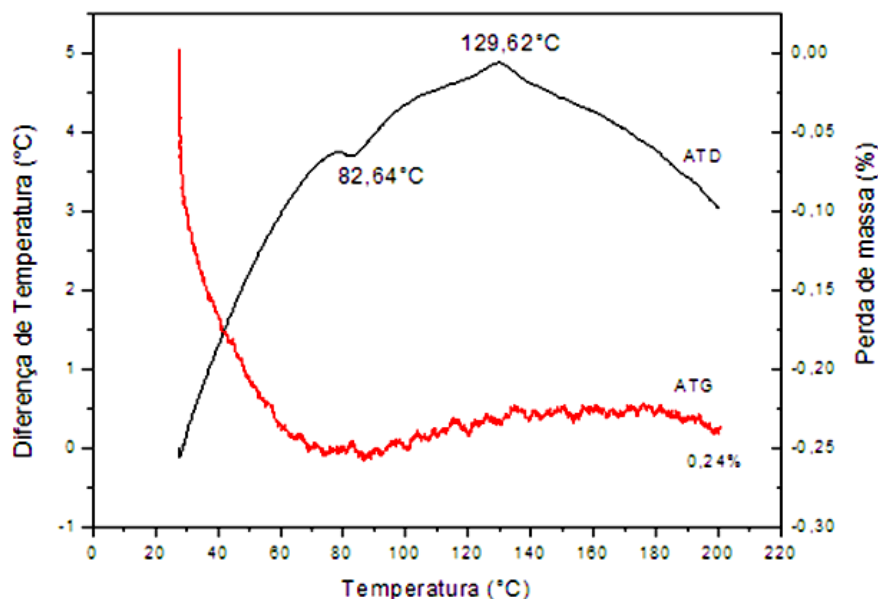
Os resultados das análises termogravimétricas, utilizadas para medir a variação da perda de massa durante o aquecimento da amostra de PET micronizado pós consumo estão apresentados na Figura 4.10.

Observa-se equivalência nas curvas mostradas ao comparar com as obtidas por Souza (2012), já apresentadas na Figura 2.11.

Analisando-se os resultados, observa-se que a massa do PET diminui com o aumento da temperatura, e que essa tendência se inicia a aproximadamente 32 °C., conforme se pode constatar no gráfico.

Verifica-se também que até aproximadamente 83 °C o material apresenta mudança do estado sólido para o estado líquido, havendo uma perda da massa do PET. Tais condições corroboram para uma melhor homogeneização do processo de mistura entre o CAP e o PET.

Figura 4.10 - Análises de Termogravimetria (TG)/ Análise Térmica Diferencial (ATD)



A partir da temperatura de 83 °C observa-se também um discreto aumento na massa do PET, indicando que uma nova mudança de estado físico ocorreu (líquido para vapor), e essa perda continua até temperaturas próximas aos 200°C, obtendo-se uma perda total de massa de 0,24%.

Espectros de Infravermelho

Nas Figuras de 4.11 a 4.14 são apresentados os resultados das análises de espectros de infravermelho para as amostras de CAP PURO 50/70 e CAP modificado com 4% ,5% e 6% de PET, respectivamente.

Figura 4.11 - Espectro de Infravermelho do CAP puro 50/70.

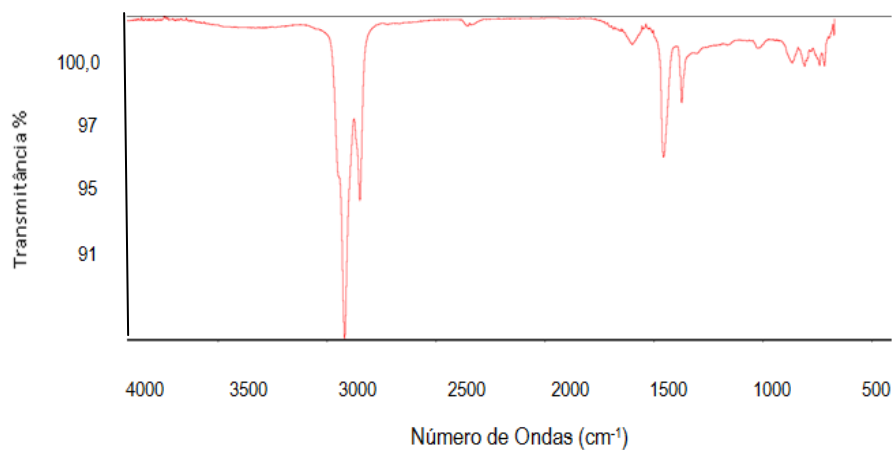


Figura 4.12 - Espectro de Infravermelho do CAP com 4% de PET.

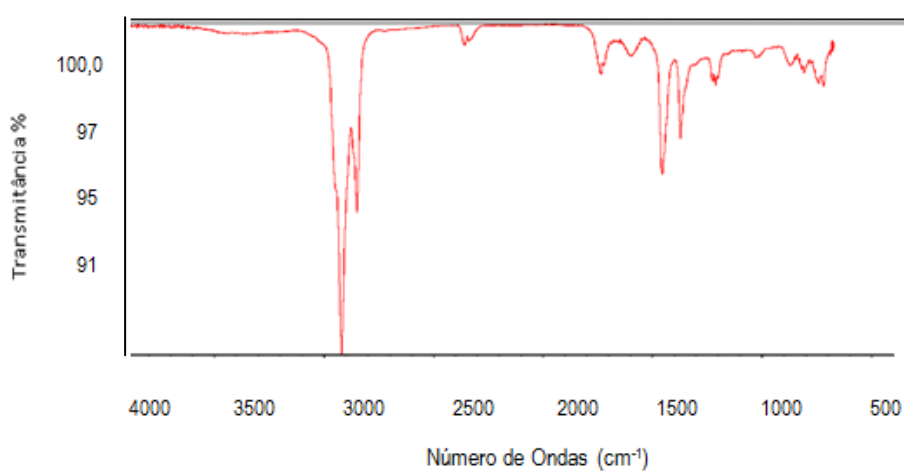


Figura 4.13 - Espectro de Infravermelho do CAP com 5% de PET.

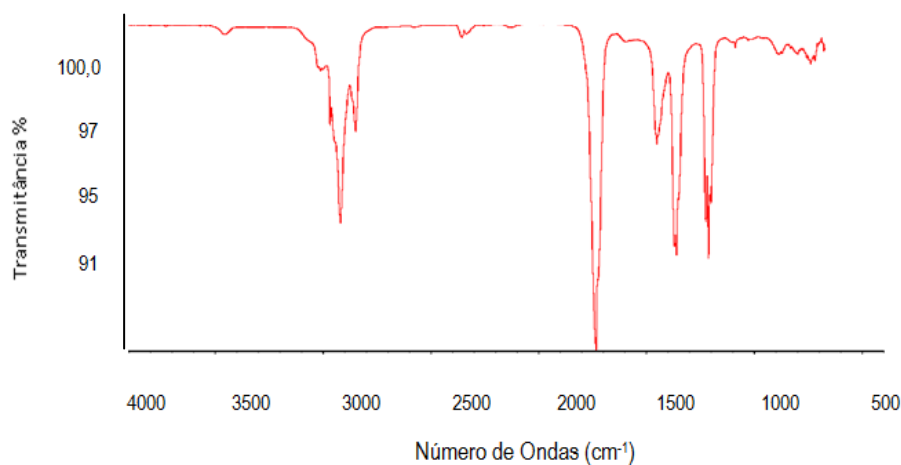
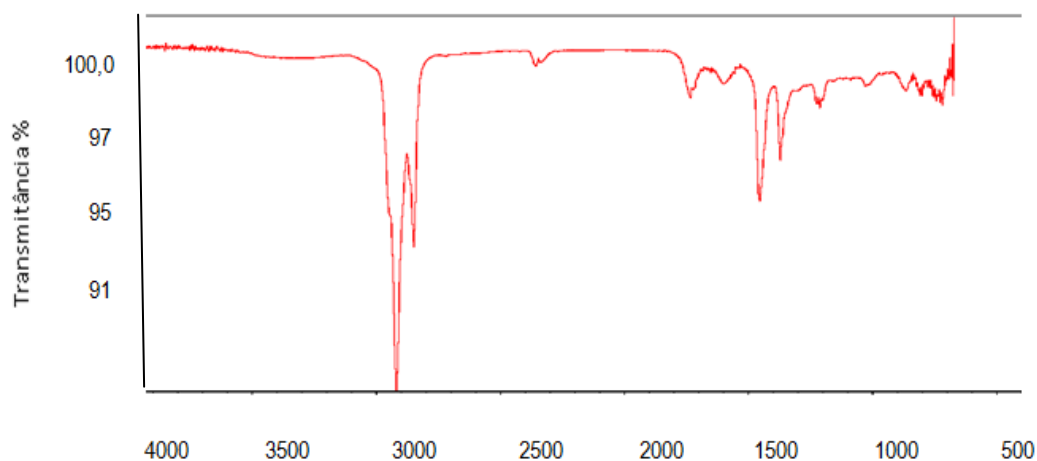


Figura 4.14 - Espectro de Infravermelho do CAP com 6% de PET



De acordo com o apresentado nas Figuras 4.11 e 4.14 e o confronto com o que existe na fundamentação teórica, para os espectros do PET, destacaram-se as absorções correspondentes a vibração da ligação C=O do grupo funcional éster (1720 cm^{-1}), da ligação C-O éster ($1310\text{-}1250\text{ cm}^{-1}$) e ao estiramento angular fora do plano da vibração da ligação C-H do grupo aromático (726 cm^{-1}).

Os picos característicos foram os de anel aromático para-substituído, dobramento fora do plano (=C-H) de maior intensidade em 744 cm^{-1} e uma absorção de intensidade fraca em 1946 cm^{-1} .

A análise do CAP puro apresentou a faixa de carbonila entre 1.650 e 1.780, enquanto que a faixa de sulfóxido ficou entre 1.007 e 1.065. Com o CAP puro, os espectros se posicionaram próximos. Em síntese, as amostras de CAP e PET utilizadas na pesquisa apresentam resultados que, quando comparados ao dos exemplos de Mirande (2010) e Souza (2012), caracterizam suas cadeias poliméricas. Tais condições são importantes para a comprovação polimérica dos materiais.

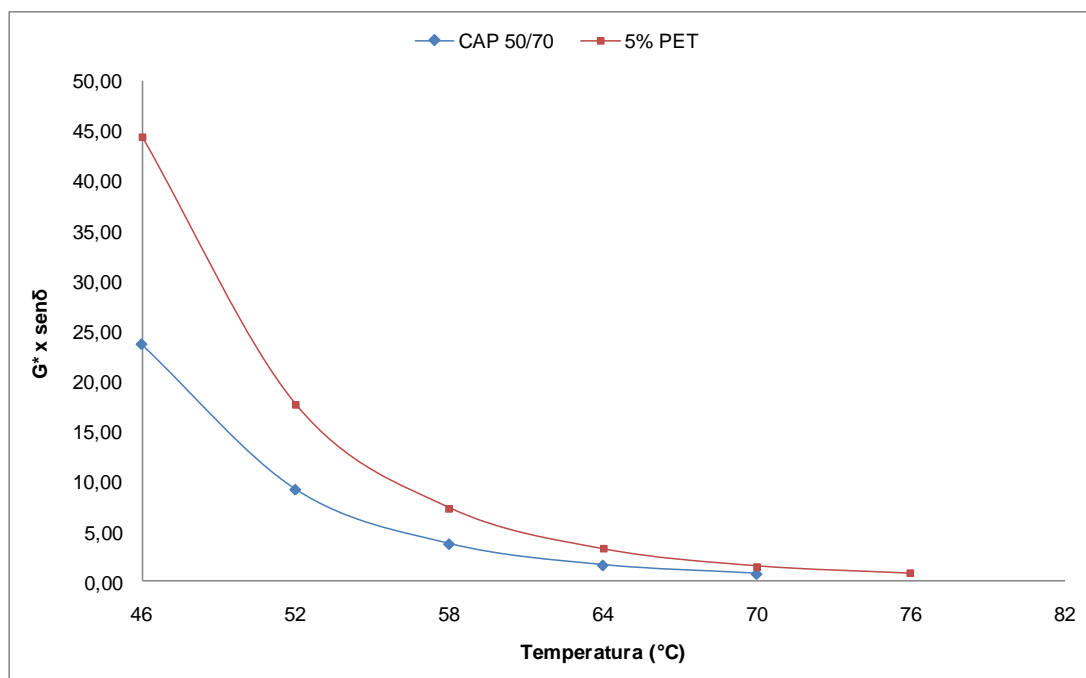
4.3 Propriedades Reológicas

Grau de Desempenho – PG

O Grau de Desempenho (PG) de um ligante asfáltico é definido por duas temperaturas que delimitam a faixa de utilização do mesmo: uma indicando a temperatura máxima para uso, de forma a manter um desempenho satisfatório (baixa deformação permanente), e outra indicando a temperatura mínima de forma a evitar o trincamento por baixa temperatura.

Os resultados lançados em gráficos contidos na Figura 4.15 indicam a variação do parâmetro $G^* \cdot \sin \delta$ em função da temperatura, antes do envelhecimento simulado (RTFO), para o CAP puro e o CAP modificado.

Figura 4.15 - Relação do parâmetro $G^* \cdot \sin \delta$ em função da temperatura.

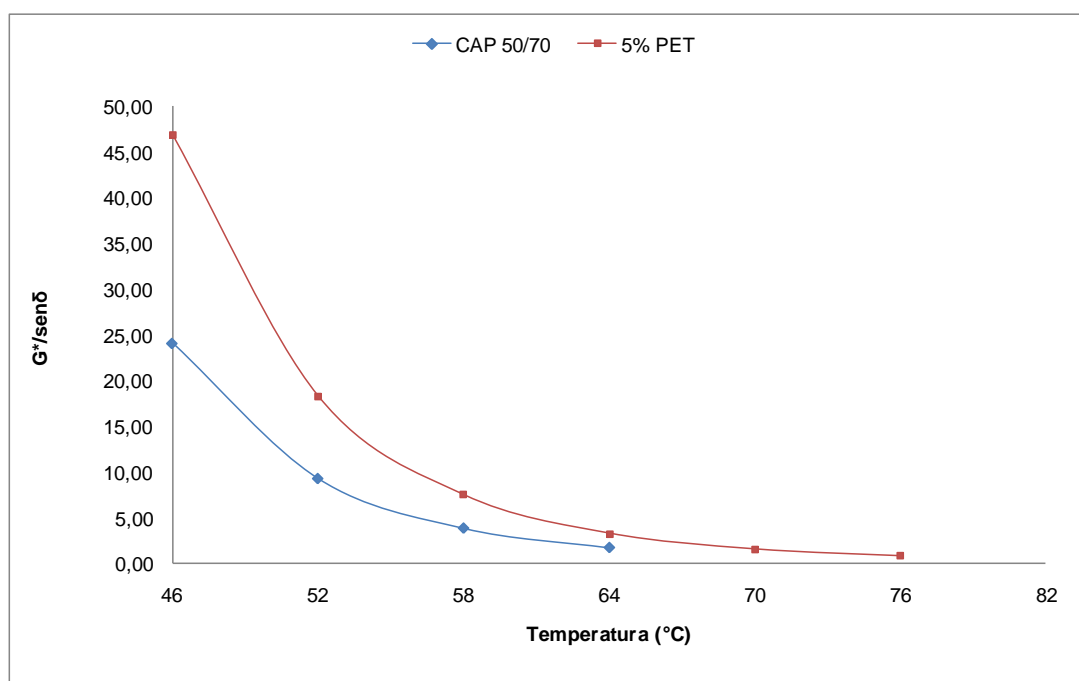


A associação do Módulo Complexo com o ângulo de fase ($G^* \cdot \sin \delta$) é um critério de avaliação da resistência do ligante à vida de Fadiga (conforme adotado pelo SHRP) . De acordo com o gráfico

apresentado, o CAP puro sofreu uma perda na resistência à Fadiga maior do que o CAP modificado com 5% de PET.

Na Figura 4.16 é lançada em gráfico os resultados inerentes a variação do parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ em função da temperatura do ligante, antes do envelhecimento simulado (RTFO), para o CAP puro e modificado.

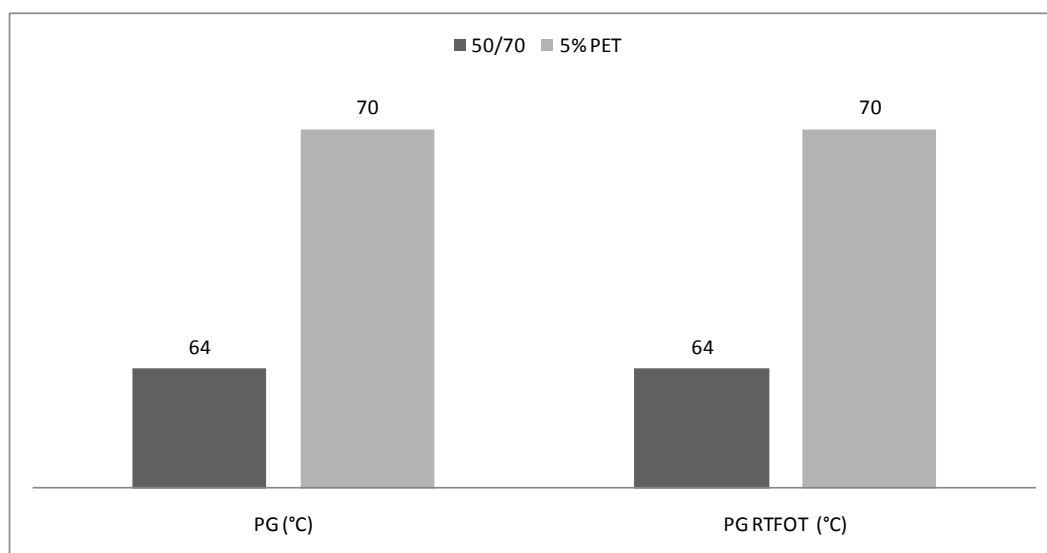
Figura 4.16 - parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ em função da temperatura.



A relação do Módulo Complexo com o ângulo de fase ($G^*/\text{sen}\delta$) é um critério de avaliação da resistência do ligante à deformação permanente (conforme adotado pelo SHRP). O CAP puro apresentou uma perda na resistência à deformação permanente maior do que o CAP modificado com 5% de PET. Pode-se inferir com isso, que o desempenho do CAP modificado foi superior ao CAP puro em termos reológicos de vida de Fadiga e Deformação Permanente.

De acordo com a Figura 4.17 pode-se observar o Grau de Desempenho (PG) para o CAP puro e modificado.

Figura 4.17 - Grau de Desempenho (PG) do CAP puro e modificado.



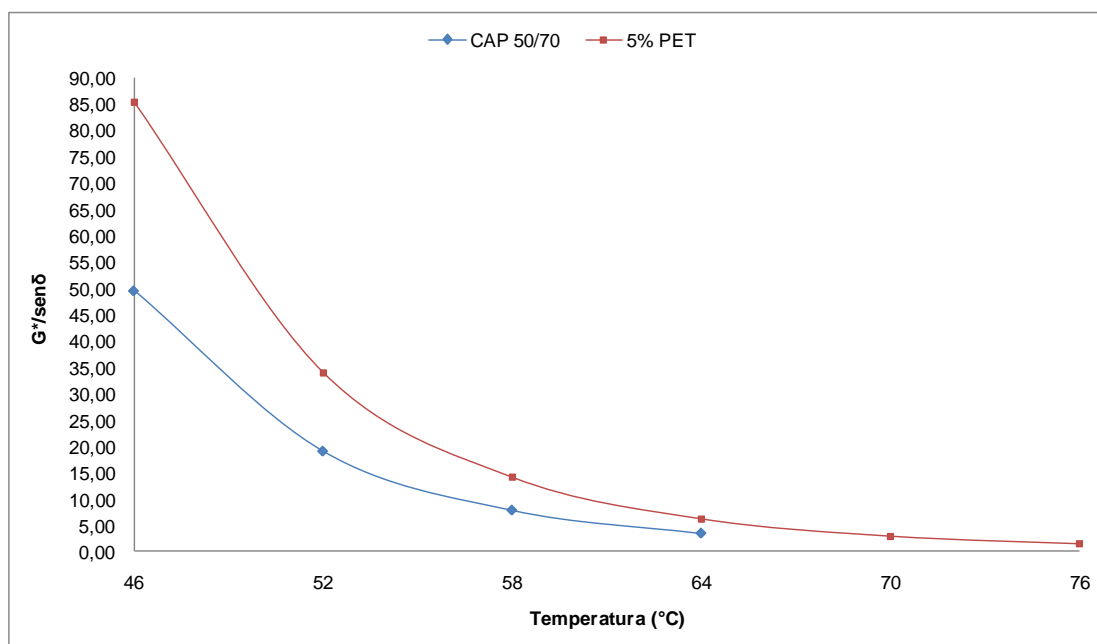
De acordo com a especificação Superpave, os resultados de PG incrementam ao CAP uma medida das propriedades fundamentais sobre diferentes temperaturas, estabelecendo, dentro de critérios pré-determinados, a faixa de temperatura de aplicação de um determinado ligante. Esta especificação também sugere que a temperatura máxima recomendada para uso de um ligante asfáltico será aquela na qual o valor da relação $G^*/\sin \delta$ for superior a 1,0 kPa antes do seu envelhecimento no RTFO e superior a 2,2 kPa após este ensaio.

De acordo com resultados obtidos, o CAP puro apresenta propriedades reológicas adequadas na temperatura de 64 °C e o CAP modificado na temperatura de 70 °C. O CAP modificado apresenta PG superior ao puro, suportando com melhor desempenho as condições climáticas “severas” da área onde será aplicado e sob condições de tráfego pesado (volume e tempo de aplicação de carga).

De acordo com a Figura 4.18 pode-se observar a variação do parâmetro $G^*/\sin \delta$ em função da temperatura, após o envelhecimento simulado (RTFO), para o CAP puro e modificado.

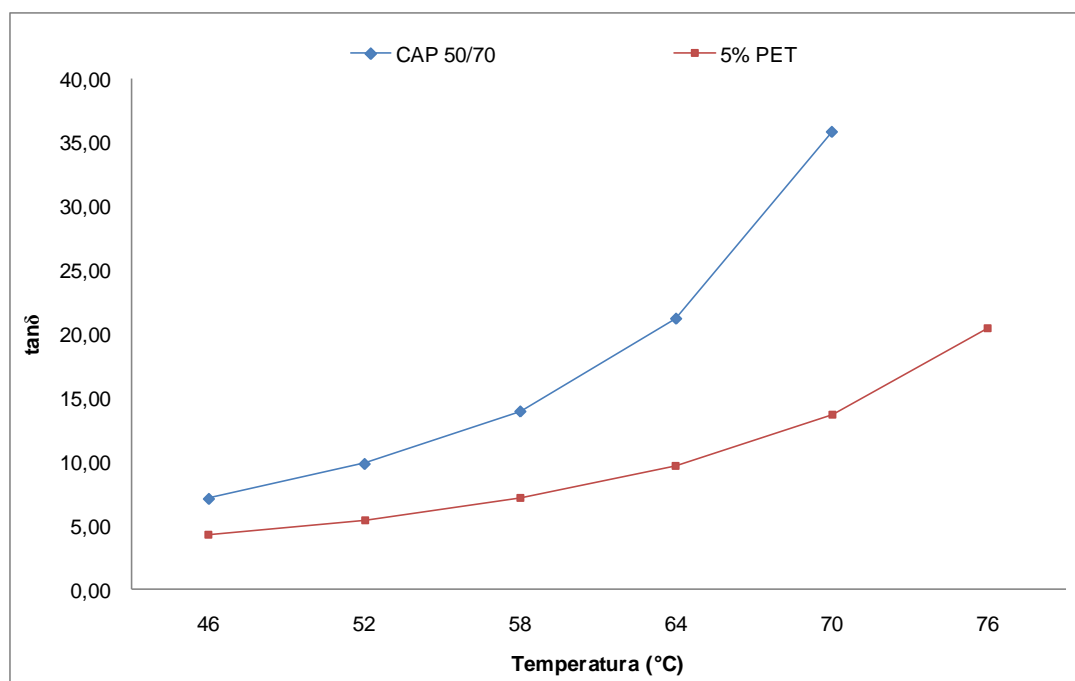
Os resultados obtidos comprovam que em termos reológicos, a vida útil do revestimento asfáltico modificado é superior ao puro, visto que após o envelhecimento a curto prazo (RTFO) o CAP modificado com 5% de PET apresentou o melhor desempenho do que o CAP puro.

Figura 4.18 - Parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ em função da temperatura.



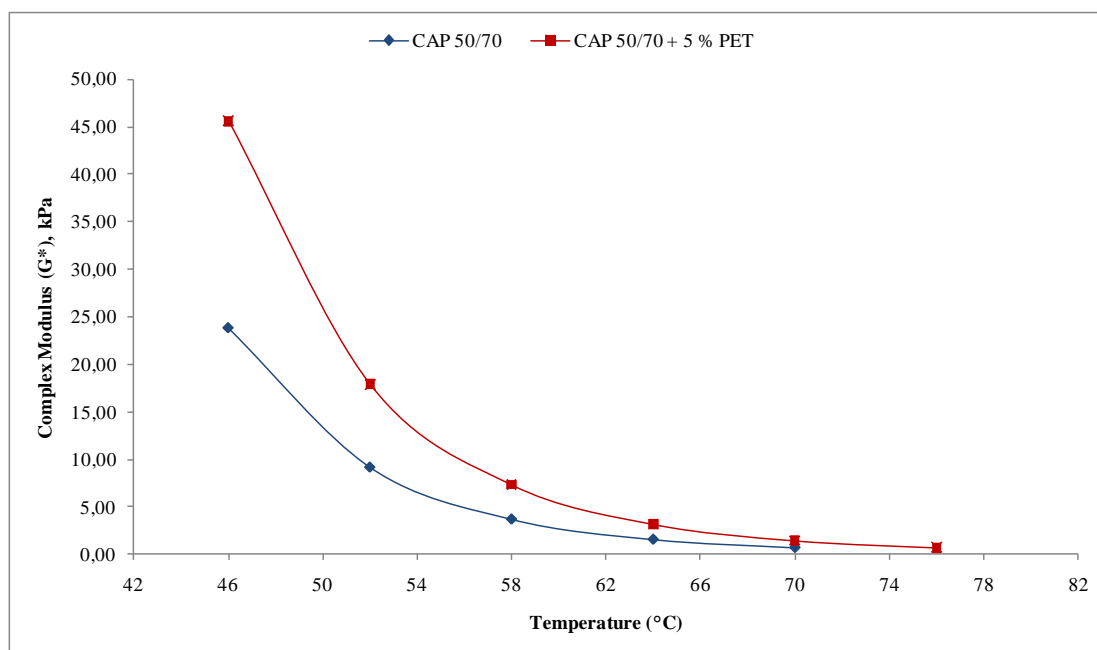
De acordo com as Figuras 4.19 e 4.20 pode-se observar a variação do parâmetro $\text{Tan } \delta$ e do Módulo Complexo δ do CAP puro e modificado em função da temperatura, respectivamente.

Figura 4.19 - Parâmetro $\text{Tan } \delta$ em função da temperatura.



Em relação ao CAP puro, o CAP modificado apresentou módulo complexo maior e ângulo de fase menor com a elevação da temperatura. Estes resultados indicam uma maior rigidez ao CAP com adição de 5% de PET. Assim, o desempenho dos CAPs modificados, considerando o comportamento reológico, foi superior ao CAP puro.

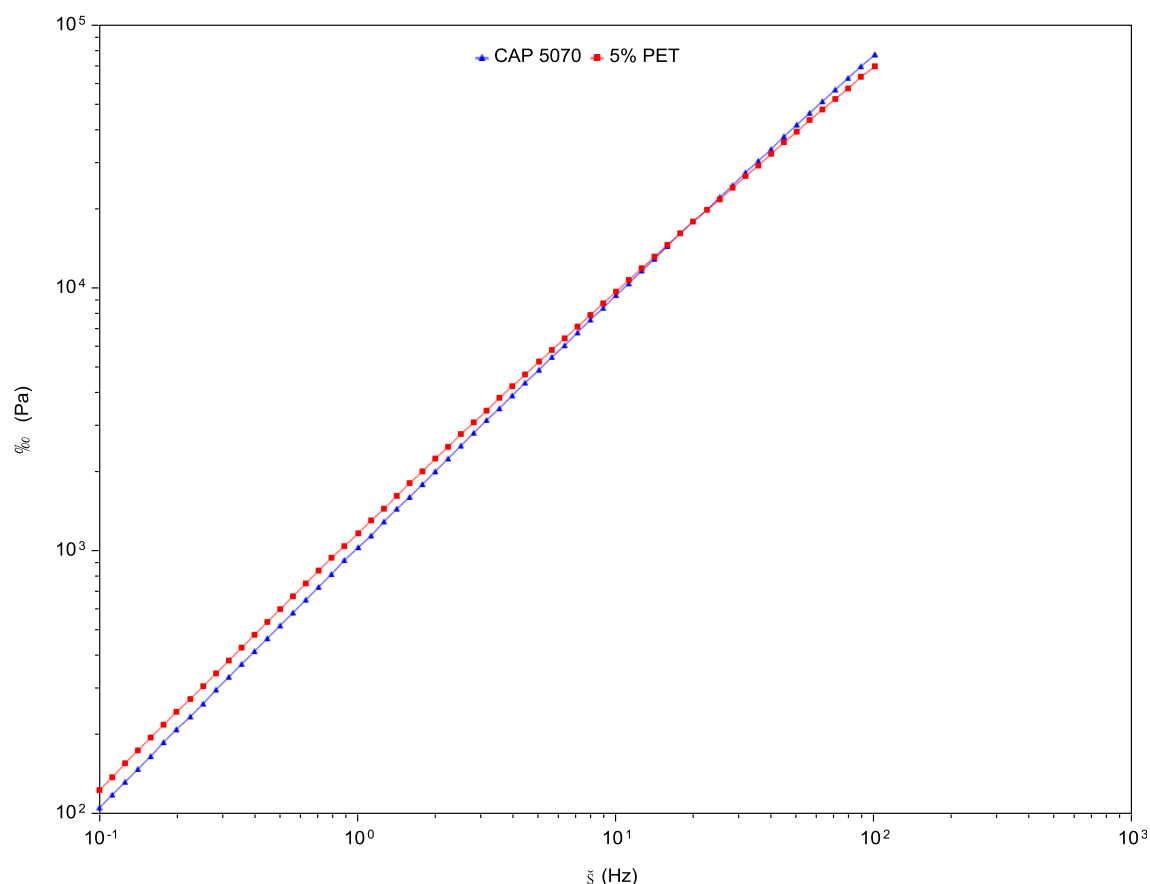
Figura 4.20 - Parâmetro Módulo Complexo δ em função da temperatura.



Com o objetivo de se estabelecer a região de viscoelasticidade linear para definir os parâmetros visco elásticos dos CAPs, foram lançadas em gráficos as curvas de módulo complexo (%) em função da tensão de cisalhamento para os CAPs puros e modificados sob diferentes temperaturas e frequências, conforme mostrado na Figura 4.21.

De acordo com a Figura 4.21 os resultados para o CAP puro apresentaram o mesmo comportamento do CAP modificado para as frequências, próximas a 10^1 Hz. À medida que se diminui a frequência desse intervalo, diminui a região de viscoelasticidade linear para o CAP puro. Quando aumentada a frequência de 10^1 Hz observa-se uma diminuição na viscoelasticidade linear do CAP modificado. Esta região de viscoelasticidade linear é aquela que o módulo complexo não varia com a tensão de cisalhamento. De acordo com o resultado obtidos pode-se avaliar que o CAP puro trabalhou uma faixa maior de dependência quanto à tensão do que o modificado.

Figura 4.21- Módulo complexo em função da tensão de cisalhamento.



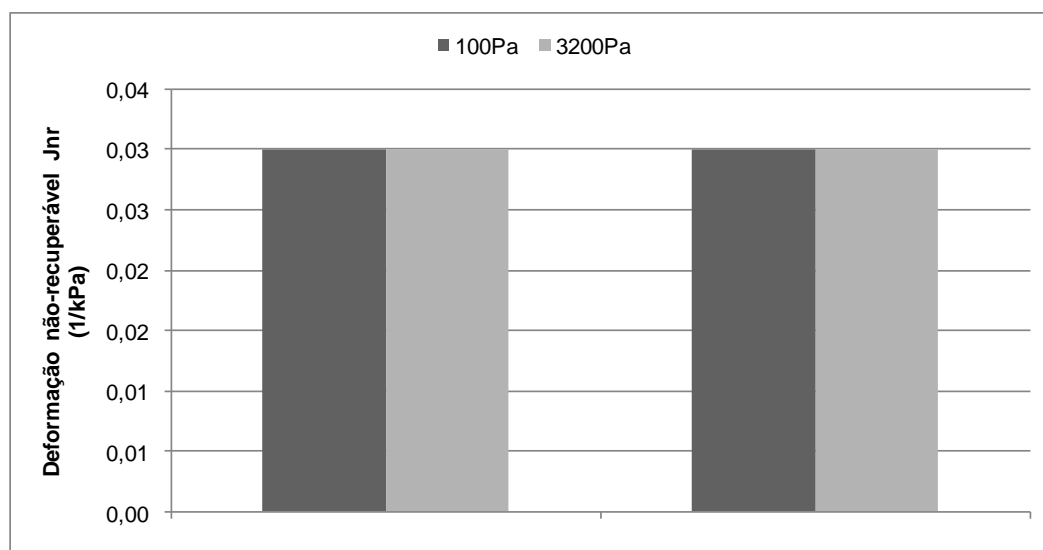
Fluência e Recuperação sobre Tensão Múltipla – MSCR

O MSCR foi utilizado neste estudo para caracterizar o comportamento fluência-recuperação do CAP puro e modificado virgens e envelhecidos a curto prazo. Além dos resultados destes ensaios, foram utilizados os valores de penetração, ponto de amolecimento, incremento de viscosidade e perda de massa para verificar quais ligantes asfálticos apresentam melhor comportamento à luz das propriedades e parâmetros considerados.

O MSCR utilizado tanto para os CAPs puros quanto para os modificados indicam que estes ligantes possuem desempenhos satisfatórios quando submetidos a altas temperaturas.

A Figura 4.22 apresenta as relações entre os percentuais de recuperação para o CAP puro e o CAP modificado, considerando a condição envelhecida desses materiais e os níveis de tensões entre 100 Pa a 3.200 Pa.

Figura 4.22 - Gráficos de Fluência e Recuperação sobre Tensão Múltipla

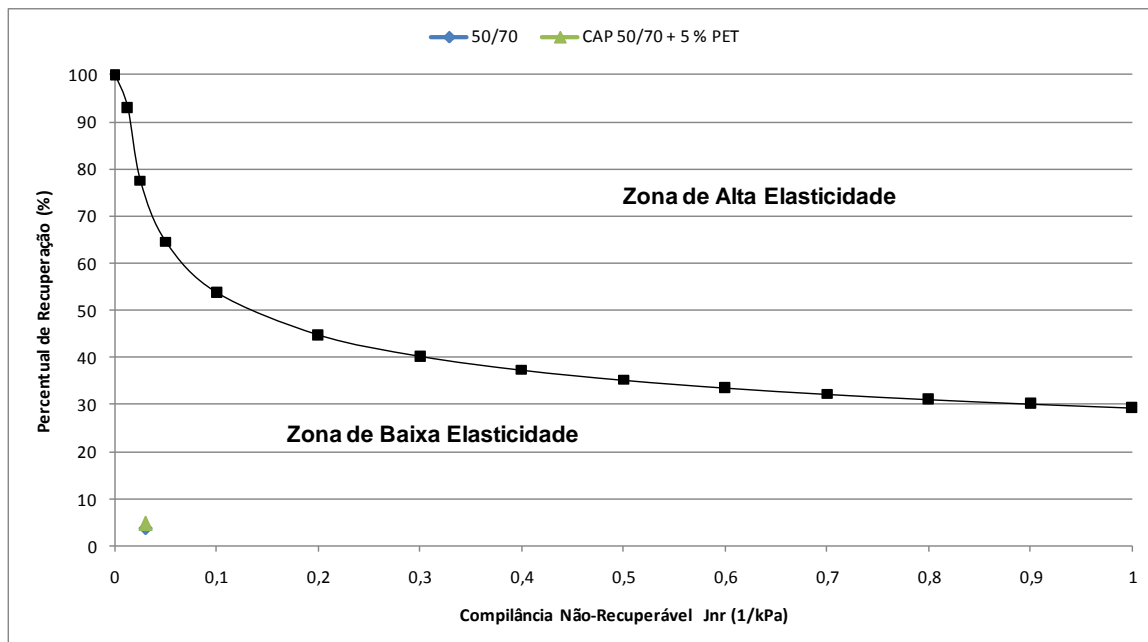


De acordo com os resultados obtidos é possível observar que os CAPs puros e modificados mantêm constante a deformação não recuperável após o aumento dos tempos de fluência e recuperação de 1 e 9s. Esse ensaio é utilizado para CAPs modificados com elastômeros. Para o caso do PET que encontra-se na zona de rigidez, os resultados de MSCR podem ser utilizados como confirmação dessa propriedade.

Os valores mínimos de percentual de recuperação podem ainda serem apresentados de forma gráfica, onde os pares ordenados acima da curva são considerados de alta elasticidade e aqueles abaixo da curva de baixa elasticidade.

De acordo com a Figura 4.23 é observado o percentual de recuperação (%) em função da compliância. Os resultados indicam que o CAP puro e o CAP modificado mantêm as suas propriedades na zona de baixa elasticidade.

Figura 4.23 - Percentual de recuperação (%) em função da compliância.



Ensaio de Estabilidade a Estocagem

O ensaio de estabilidade à estocagem é descrito na norma ES 385/99 do DNIT e determina a viabilidade da utilização do PET na usina de asfalto quanto a homogeneidade da proporção da mistura. Conforme a norma, para que uma mistura CAP+Polímero possa ser utilizado a variação da temperatura deverá compreender o intervalo $\Delta t \leq 3^{\circ}\text{C}$. De acordo com o resultado dessa pesquisa o CAP+PET compreende uma mistura heterogênea e apresenta falta de estabilidade à estocagem. A leitura de topo foi de 46°C e a leitura de fundo não foi encontrada para essa mistura.

4.4 Dosagem Superpave com o CAP puro

A dosagem Superpave teve início com a adoção das composições granulométricas das três misturas (inferior, intermediária e superior). A partir destas proporções e dos tipos de agregados, foi estimado teoricamente o teor de CAP inicial.

O critério de parada considerado na compactação dos corpos de prova por amassamento foi o número de giros como parâmetro relativo ao tráfego médio/alto, comum em avenidas de cidades de médio e grande porte e em rodovias estaduais e federais. Os valores do número de giros compreenderam em: 8 giros para N_{inicial} (inicial); 100 giros para N_{projeto} (projeto); e 160 giros para o $N_{\text{máximo}}$ (máximo).

Na Tabela 4.9, estão listados os teores de CAP iniciais para a Primeira Fase da Dosagem, bem como uma síntese dos resultados iniciais.

Tabela 4.9 - Parâmetros volumétricos em função dos teores de CAPs iniciais.

<i>Mistura</i>	<i>% CAP</i>	<i>%G_{mmi}</i>	<i>%G_{mmN}</i>	<i>%G_{mmmax}</i>	<i>%P/A</i>	<i>%V_{Vp}</i>	<i>%V_{am}</i>	<i>%RBV</i>
1S (Superior)	4,25	90,93	93,38	96,09	1,02	6,62	15,79	74,67
2M (Mediana)	4,25	91,02	96,07	96,69	1,19	3,93	14,01	71,47
3I (Inferior)	4,25	94,11	96,93	96,40	1,10	3,07	13,68	70,96
<i>Critério</i>	<i>4,00</i>	<i>≤89,00</i>	<i>≤96,00</i>	<i>≤98,00</i>	<i>0,6-1,2</i>	<i>4,00</i>	<i>≥ 13,0</i>	<i>65 a 75</i>

Na Segunda Fase da Dosagem foi definida a mistura de trabalho com a escolha de um novo teor, de 4,3% CAP, a partir das massas específicas dos agregados, do CAP e do percentual de agregados na mistura.

A curva de projeto mediana denominada de 2M com 4,25% de CAP foi a que melhor apresentou resultados conforme critérios preconizados da dosagem SUPERPAVE, pela qual fixa os volumes de vazios em 4%.

Nesta Fase foram compactados os corpos de prova (Curva Intermediária) com variação sobre teor de referência de 4,3 % nas seguintes proporções: $\pm 0,5\%$ e $+1\%$, ou seja: 3,8%; 4,3%; 4,8% e 5,3%. Em função destes, foram moldados vinte e quatro (24) corpos de prova, sendo seis (6) para cada teor, respectivamente.

Na Tabela 4.10 são apresentados os resultados dos parâmetros volumétricos resultantes da segunda fase da dosagem. Nessa fase foi escolhido o teor de projeto em função dos parâmetros estimados para as misturas asfálticas.

Estes parâmetros estão lançados em gráficos em seqüência lógica, a qual permitiu a definição do teor de projeto, o qual foi usado na composição das misturas para a avaliação das propriedades mecânicas a partir dos ensaios de: Resistência à Tração por Compressão Dametral, de Resistência a Umidade Induzida e de Módulo de Resiliência.

Tabela 4.10 - Dosagem para os teores de CAP estimados: curva intermediária

<i>Teor de CAP</i>	<i>%G_{mmi}</i>	<i>%G_{mmN}</i>	<i>%G_{mmáx}</i>	<i>%V_{v,p}</i>	<i>%V_{am}</i>	<i>%RBV</i>
Curva 2M – 3,80% de CAP	90,91	94,94	96,23	5,06	14,37	72,17
<u>Curva 2M – 4,25% de CAP</u>	<u>91,02</u>	96,07	<u>96,69</u>	<u>3,93</u>	<u>14,01</u>	<u>71,47</u>
Curva 2M – 4,30% de CAP	91,44	96,59	97,29	3,41	14,42	72,38
Curva 2M – 4,80% de CAP	91,46	98,69	96,80	1,31	13,43	70,81
Curva 2M – 5,30% de CAP	92,14	99,23	96,74	0,77	13,38	70,80
<i>Critério</i>	<i>≤89,00</i>	<i>≤96,00</i>	<i>≤98,00</i>	<i>4,00</i>	<i>≥ 13,0</i>	<i>65 a 75</i>

4.5 Propriedades mecânicas das misturas asfálticas.

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos por meio da adição de três teores de PET (4%, 5% e 6%) ao CAP. A partir da análise das propriedades volumétricas e mecânicas, foi considerado como teor ideal de PET micronizado aquele que apresentou melhor desempenho para as misturas asfálticas. Por meio das Tabelas 4.11 e 4.12 e das Figuras 4.24 a 4.26 verificamos os resultados das propriedades volumétricas e mecânicas para o CAP puro e modificado.

Tabela 4.11 - Propriedades volumétricas do CAP puro e adição de PET de 4%, 5% e 6%.

	<i>%V_{v,p}</i>	<i>%V_{am}</i>	<i>%RBV</i>
Puro	3,93	14,07	72,06
4%	3,95	14,12	72,00
5%	4,01	14,14	71,66
6%	4,13	14,25	71,01
Critério	4,00	≥ 13,0	65 a 75

Tabela 4.12 - Propriedades mecânicas com o CAP Puro e Adição de PET de 4%, 5% e 6%.

<i>Propriedades Mecânicas</i>			
	Resistência à Tração (MPa)	Resistência a Umidade Induzida (%)	Módulo de Resiliência (MPa)
Puro	1,22	80,69	8.138
4%	1,29	80,20	8.710
5%	1,34	83,36	10.704
6%	1,51	93,35	6.720

De acordo com a análise das propriedades volumétricas, o teor que apresentou o melhor desempenho conforme dosagem Superpave foi o de 5%, com volumes de vazios conforme preconizado por norma. O Módulo de Resiliência teve um incremento no resultado pico para esse percentual (Tabela 39).

Figura 4.24 - Propriedade mecânica de R.T. em Função do Percentual de PET

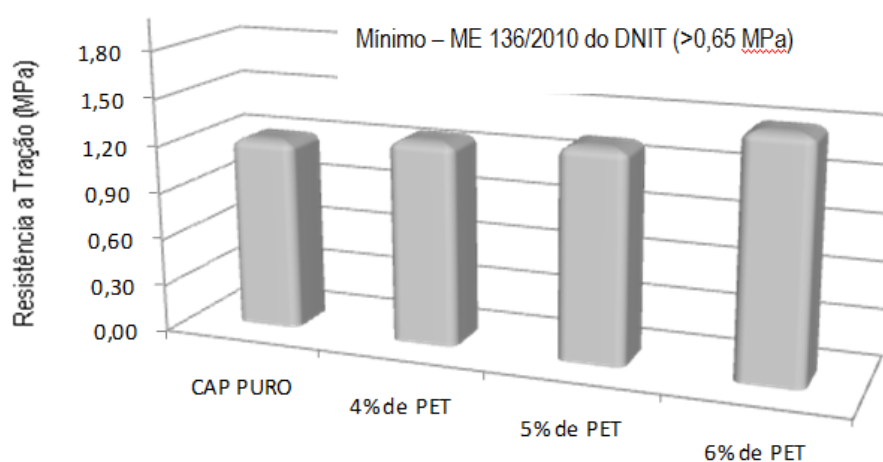


Figura 4.25 - Propriedades mecânicas a Umidade Induzida

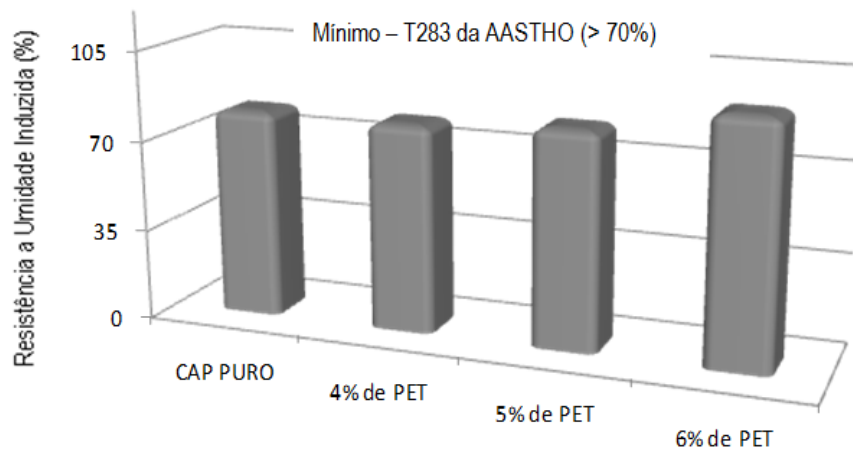
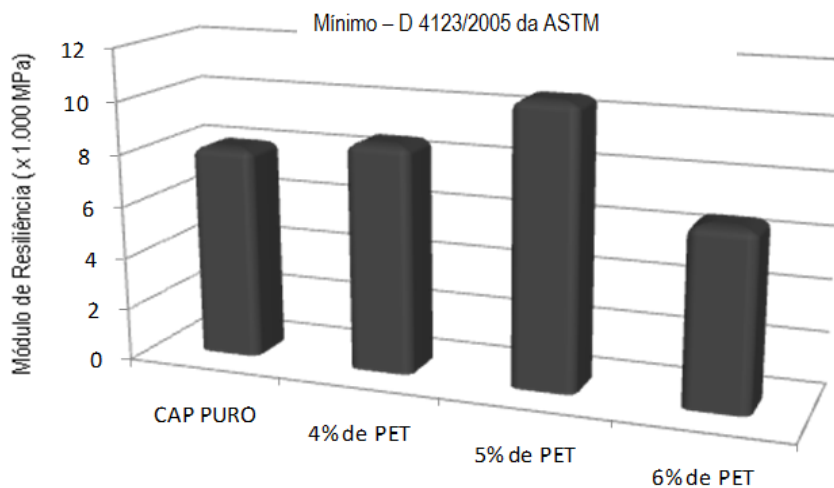


Figura 4.26 - Propriedades mecânicas de Módulo de Resiliência



A partir da Tabela 4.12 e Figuras 4.24 e 4.26 pode-se observar que houve um incremento em termos de propriedades mecânicas com a adição do pet micronizado. O critério de escolha do melhor percentual de PET adicionado as misturas asfálticas foi de acordo com os parâmetros volumétricos preconizados pelo método Superpave, 4% de Vazios. Nesse caso, o teor de 5% de PET corresponde ao melhor percentual a ser adicionado as misturas asfálticas, atendendo os parâmetro volumétricos e melhorando as propriedades mecânicas.

4.6 Dosagem por meio do procedimento Superpave com o CAP modificado

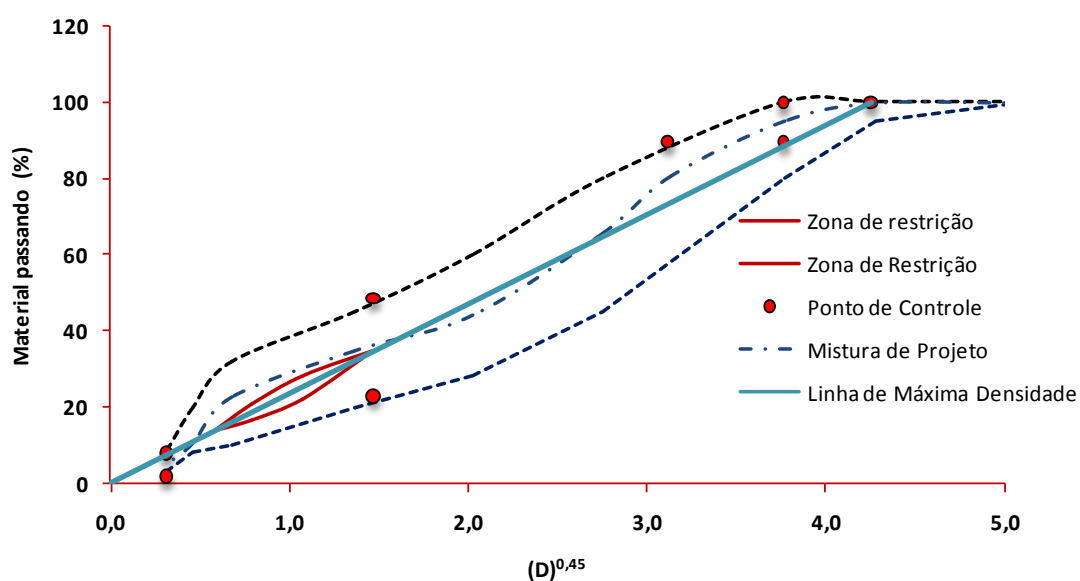
Misturas asfálticas pelo procedimento de compactação Superpave foram preparadas nesse estudo para estimar as características do asfalto modificado em relação ao desempenho dos pavimentos. Nesse processo, 5% do PET micronizado é misturado ao CAP e em seguida realizado uma dosagem Superpave com o asfalto modificado.

A dosagem Superpave com o CAP modificado teve seus procedimentos padrão de etapas análogos aos apresentados nesse estudo para a dosagem com CAP puro. Pode-se observar a partir da Tabela 4.13 e da Figura 4.27 a composição granulométrica da mistura asfáltica e a curva de projeto, respectivamente, para o CAP modificado. O critério de escolha da curva foi a que apresenta o melhor desempenho para a dosagem com CAP puro.

Tabela 4.13 - Composição granulométrica para mistura de projeto – CAP modificado.

<i>Percentagem Passante – Mistura de Projeto Intermediária (2M)</i>						
Brita 25	Brita 19	Brita 12,5	Areia	Pó de Pedra	Filer	Especificação
10%	13%	30%	15%	30%	2%	Faixa B - DNIT

Figura 4.27 - Curva de projeto (CAP modificado).



Nesta fase foram compactados os corpos de prova (Curva Intermediária) com variação sobre o teor de referência de 4,00 % nas seguintes proporções: $\pm 0,5\%$ e $+1\%$, ou seja: 3,7%; 4,2%; 4,7% e 5,2%. Em função destes, foram moldados vinte e quatro (24) corpos de prova, seis (6) para cada teor, respectivamente (Tabela 4.14).

Tabela 4.14 - Dosagem para os CAPs + 5% PET : curva intermediária selecionada.

<i>Teor de CAP</i>	<i>%G_{mmi}</i>	<i>%G_{mmN}</i>	<i>%G_{mmMáx}</i>	<i>%V_{vp}</i>	<i>%V_{am}</i>	<i>%RBV</i>
Curva 2M – 3,70% de CAP	90,68	94,77	95,85	5,23	16,47	75,34
Curva 2M – 4,00% de CAP	90,56	96,04	96,55	3,96	15,48	74,17
Curva 2M – 4,20% de CAP	90,59	96,91	96,27	3,09	14,96	73,35
Curva 2M – 4,70% de CAP	91,70	97,07	96,23	2,93	15,02	73,56
Curva 2M – 5,20% de CAP	90,87	97,68	96,97	2,32	14,83	73,31
<i>Critério</i>	<i>≤89,00</i>	<i>≤96,00</i>	<i>≤98,00</i>	<i>4,00</i>	<i>≥ 13,0</i>	<i>65 a 75</i>

A mistura asfáltica que mais se aproximou do percentual de Volume de Vazios preconizado pela metodologia Superpave de 4% foi o da curva mediana (Curva 2M), com 3,96% de Volume de Vazios para um teor de projeto de 4% de CAP.

As Tabelas 4.15 e 4.16 apresentaram os resultados das propriedades volumétricas e mecânicas, respectivamente, para a dosagem com o CAP modificado.

Tabela 4.15 - Propriedades volumétricas da dosagem Superpave com CAP modificado (5%)

	<i>%V_{vp}</i>	<i>%V_{am}</i>	<i>%RBV</i>
5%	3,96	15,48	74,17
Critério	4,00	≥ 13,0	65 a 75

Tabela 4.16 - Propriedades mecânicas da dosagem Superpave com CAP modificado (5%).

<i>Propriedades Mecânicas</i>			
	Resistência à Tração (MPa)	Resistência a Umidade Induzida (%)	Módulo de Resiliência (MPa)
(Teor de PET) 5%	1,41	86,29%	14.216

Os valores de Resistência à Tração, Percentual de Resistência por efeito da Umidade Induzida e Módulo de Resiliência das misturas asfálticas contendo PET foram superiores aos da mistura convencional. Os resultados indicam que a melhor propriedade foi obtida pela dosagem Superpave com a adição de 5% de PET, que apresentaram incrementos 13,5%, 6,5% e 43% em comparação com a mistura convencional. Como apresentado nas Tabelas 4.17 e 4.18, pode-se verificar uma síntese das propriedades volumétricas e mecânicas das misturas asfálticas conforme estudo.

Tabela 4.17 - Resumo dos resultados das propriedades volumétricas.

	%Vvp	%Vam	%RBV
CAP Puro	3,93	14,07	72,06
Adição de 4% PET – Dosagem CAP Puro	3,95	14,12	72,00
Adição de 5% PET – Dosagem CAP Puro	4,01	14,14	71,66
Adição de 6% PET – Dosagem CAP Puro	4,13	14,25	71,01
Adição de 5% PET – Dosagem CAP Modificado	3,96	15,48	74,17
Critério	4,00	13,0	65% a 75%

O CAP modificado (5% de PET - Dosagem CAP Modificado) apresentou melhores propriedades mecânicas em relação ao CAP puro com um aumento de 16% de Resistência à Tração, 6.5% no percentual de Resistência a Umidade Induzida e 43% no Módulo de Resiliência, associado a um teor mais econômico de projeto para as misturas asfálticas, passando de 4,25% para 4,00%.

Tabela 4.18 - Resumo dos resultados das propriedades mecânicas

	Resistência à Tração (MPa)	Resistência a Umidade Induzida (%)	Módulo de Resiliência (MPa)
CAP Puro	1,22	80,69	8.138
Adição de 4% PET – Dosagem CAP PURO	1,29	80,20	8.710
Adição de 5% PET – Dosagem CAP PURO	1,34	83,36	10.704
Adição de 6% PET – Dosagem CAP PURO	1,51	93,35	6.720
Adição de 5% PET – Dosagem CAP Modificado	1,41	86,29	14.216

Portanto, tais incrementos no valor do Módulo de Resiliência devem ser analisados, em caso de dimensionamento de camadas de pavimentos flexíveis, associando aos estudos de compatibilidade de deformações entre as camadas da estrutura do pavimento. Em contrapartida, como a mistura com PET apresentou uma maior rigidez, espera-se que os resultados da ruptura por vida de fadiga da estrutura seja menor para o CAP modificado.

Verificou-se que os CAPs modificados com adição do PET foram mais resistentes quanto às suas propriedades mecânicas. A adição do PET à mistura asfáltica torna-a mais rígida e com maiores incrementos nos valores de Módulo de Resiliência. Estes incrementos podem estar relacionados, principalmente, em função do PET ser um material semicristalino dentro da mistura, o que resulta em melhores propriedades mecânicas.

Apesar do PET quando adicionado à mistura asfáltica exigir cuidados em relação à permeabilidade por apresentar uma cadeia cristalinizada formando uma película em torno do agregado, quando aquecido na mistura junto ao CAP, observa-se que provavelmente houve uma interação entre as cadeias carbônicas melhorando a susceptibilidade de umidade da mistura (Percentual de Resistência à Umidade Induzida).

Atualmente tem sido utilizada a temperatura de 25°C como referência para o ensaio de módulo de resiliência. No entanto, é possível, a realização do ensaio em outras temperaturas, mais baixas ou

ligeiramente mais elevadas, para analisar principalmente a importância do efeito da temperatura sobre no comportamento das misturas asfálticas.

Os resultados contidos na Tabela 4.19 indicam que, para a variação de temperatura em relação ao Módulo de Resiliência das misturas asfálticas modificadas com PET micronizado pós consumo, os resultados apresentaram melhores desempenhos em relação a este parâmetro.

Tabela 4.19 - Módulo de Resiliência com variação de temperaturas

Módulo de Resiliência com Variação de Temperatura (MPa)			
	5°C	25°C	40°C
CP Puro	7.738	8.138	1.595
CP Dosado (5% de PET)	10.685	14.216	1.725

Ensaio de Deformação pelo Critério Diametral (Flow Number).

De acordo com o critério de deformação permanente os resultados foram analisados com base no parâmetro oriundo do ensaio uniaxial de cargas repetidas. Os resultados do Flow Number estão apresentados para a mistura asfáltica com o CAP puro e modificado conforme apresentado na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 - Resultado da Deformação pelo critério diametral (Flow Number)

Flow Number (in/in)		
	Ciclos	Flow Point (FHWA)
CPs Puro	1.644	477
CPs Modificados (5% de PET)	1.318	363

Observa-se que o desempenho do revestimento quanto à deformação permanente foi reduzido com a adição do PET. No entanto, essa análise pode ser associada à adaptação no equipamento para realização do ensaio.

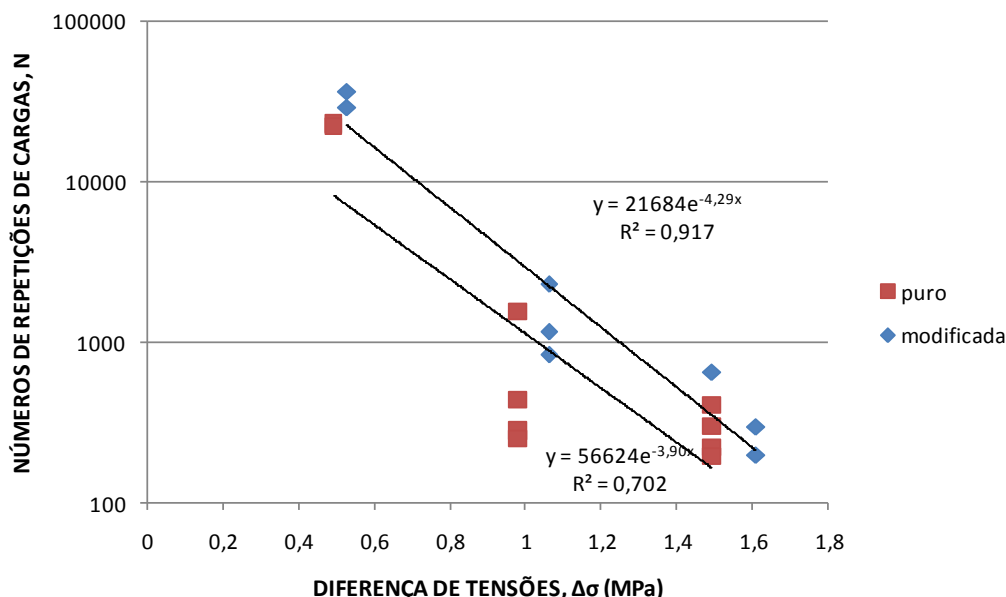
De acordo com a Reologia dos CAPs puros e modificados, a relação do Módulo Complexo com o ângulo de fase ($G^*/\text{sen } \delta$), critério de avaliação da resistência do ligante a deformação permanente adotado pelo SHRP, apresentou uma perda na resistência à deformação permanente maior para o CAP puro.

Ruptura por Fadiga

Para uma análise nos resultados de Ruptura por Vida de Fadiga foi elaborado um gráfico para os CAPs puro e modificado do número de ciclos em função da diferença de tensões em escala logarítmica.

A Figura 4.28 apresenta os valores para a Ruptura por Vida de Fadiga para o CAP puro e modificado.

Figura 4.28 - Ruptura por Vida de Fadiga.



O coeficiente de determinação R^2 corresponde à qualidade do ajuste do modelo em relação aos pontos. Quanto mais próximo de 1, menor a dispersão dos pontos ensaiados em relação ao modelo. Uma relação de misturas asfálticas com melhores desempenhos por Fadiga garante o uso de camadas com menor espessura o que torna o revestimento asfáltico mais econômico.

Em termos de parâmetros reológicos, o Módulo Complexo associado com o ângulo de fase ($G^* \cdot \text{sen } \delta$), que caracteriza o CAP quando à perda de resistência por Vida de Fadiga, apresentou melhor desempenho da resistência do ligante à Fadiga para o CAP modificado com 5% de PET, corroborando com os resultados do ensaio de vida de fadiga, onde as misturas com CAP modificado apresentaram vida

de fadiga superior em 25% quando comparadas com a mistura com CAP puro, indicando um provável melhor desempenho do revestimento asfáltico relacionado a este parametro.

De acordo com a Tabela 4.21, pode-se observar os resultados dos ensaios de ductilidade e recuperação elástica para os CAPs puro e modificado.

Tabela 4.21 - Resultados dos ensaios de Recuperação Elástica e Ductilidade

	<i>% de Recuperação Elástica a 25°C, mín.</i>	<i>Ductilidade a 25°C, mín (cm)</i>
<i>CAP Puro</i>	10,50	82,30
<i>4% PET – DOSAGEM CAP PURO</i>	11,50	44,00
<i>5% PET – DOSAGEM CAP PURO</i>	13,50	60,00
<i>6% PET – DOSAGEM CAP PURO</i>	13,50	55,00
<i>5% PET – DOSAGEM CAP Modificado</i>	14,30	72,00

As misturas modificadas apresentaram ductilidade a 25°C inferiores ao CAP puro. O PET se classifica com um Plastômero melhorador de rigidez, e a ductilidade (propriedade do material de suportar grandes deformações sem ruptura). Partindo dessas análises, os resultados conferem que o CAP com a adição de PET torna a mistura CAP+PET mais rígida e mantém praticamente a recuperação elástica do CAP inalterada.

De acordo com os resultados lançados em gráfico nas Figuras 4.29 e 4.30 pode-se verificar que os resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento e de Penetração indicam que, para estes parâmetros, uma variação menor nos resultados para o CAP modificado em relação ao CAP puro. Isto pode indicar o efeito da oxidação, processo químico pelo qual o oxigênio é adicionado a compostos aromáticos polares originais. Para o Ponto de Fulgor para o CAP puro foi de 320°C e para o CAP modificado não foi atingido para nenhum dos teores de PET. Em síntese, os CAPs modificados apresentaram um melhor desempenho em relação aos CAPs puros quando analisados sobre a ótica deste parâmetros convencionais.

5 CONCLUSÕES

Neste Capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho bem como as sugestões para futuras pesquisas.

O estudo da adição de PET ao CAP garantiu uma técnica inédita para o desempenho dos pavimentos. A adição ao CAP compatibilizou uma fase de mistura heterogênea apresentando um incremento nas propriedades físicas e mecânicas do CAP.

A partir da adição ao CAP de um teor de 5% de PET foi possível, nesse estudo, o desenvolvimento de um processo por meio da metodologia Superpave com resultados apontando melhoria nas propriedades mecânicas, em termos de rigidez, das Misturas Asfálticas.

Em termos de propriedades microestruturais, entre elas os resultados relacionados aos parâmetros obtidos com os ensaios de DRX, de DSC, de ATD, de ATG e de Infravermelho, o PET micronizado apresentou propriedades físicas similares às descritas na literatura. Este é um importante fator para garantir que o aditivo utilizado no CAP é realmente um polímero classificado como plastômero.

As propriedades reológicas do CAP puro e modificado como o Grau de Desempenho (PG) e a Fluência e Recuperação sobre Tensão Múltipla (MSCR) apresentaram resultados que indicam o aumento de rigidez do CAP quando adicionado o PET. Houve uma diminuição no Módulo Complexo (G^*) e um aumento na tangente do ângulo de Fase (δ). De acordo com as propriedades reológicas, houve um incremento nos CAPs modificados de resistência a Fadiga ($G^* \cdot \sin \delta$) e deformação permanente ($G^*/\sin \delta$).

A influência da adição de PET ao CAP, após análise dos resultados obtidos com o ensaio de estufa de filme fino rotativo (Rolling Thin Film Oven – RTFO), faz indicar que é possível a obtenção de misturas asfálticas com este tipo de aditivo de forma que tenham um incremento da vida útil do revestimento asfáltico, desde que sejam consideradas a compatibilidade de deformações entre as camadas que compõem a estrutura do pavimento flexível projetado.

As propriedades mecânicas das misturas asfálticas, como Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência com 5% de PET adicionado ao teor ótimo de CAP puro produziram um incremento de 9% e 24%, respectivamente, em relação às misturas sem adição deste agente modificador. Essa mesma comparação em relação a dosagem com o CAP modificado resultou em incrementos de 14% e 43%, respectivamente.

As misturas asfálticas modificadas com o PET obtiveram incrementos de 25% na vida de Fadiga em relação às misturas convencionais o que pode vir a garantir aos revestimentos projetados melhor desempenho e camadas mais esbeltas.

De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa e, levando-se em consideração a especificidade do trabalho, pode-se inferir que o PET micronizado pós consumo corresponde a um aditivo melhorador das propriedades reológicas do CAP 50/70, em termos de rigidez proporcionado à mistura asfáltica melhorias no seu comportamento mecânico.

Considerando que nos estudos anteriores, as análises dos resultados das misturas asfálticas estão voltadas normalmente para as misturas com os agregados típicos da ordem macroestrutural (PET+AGREGADOS), esse estudo, de forma inovadora, analisou a mistura do PET adicionado ao CAP por processo de mistura rotacional. Por meio das análises dos resultados foi possível, em termo das propriedades micro e macroestruturais, o entendimento do comportamento e a avaliação do desempenho das misturas asfálticas.

Por fim, é possível aceitar que “o resíduo do PET micronizado, com origem no pós consumo, pode ser utilizado como agente modificador do CAP e, que o mesmo é capaz de promover ganhos nas Propriedades Mecânicas de Revestimentos Asfálticos projetados a luz desse aditivo.”

5.1 Sugestões para Futuras Pesquisas

No estudo realizado ficou evidenciado a eficácia do uso do PET para utilização em pavimentos rodoviários, porém será necessária a realização de outros estudos com vistas a consolidação do uso deste aditivo.

Com isso, sugere-se para futuras pesquisas:

- ✓ efetuar um estudo de análise comparativa sobre os efeitos do teor de PET de acordo com a granulometria nas dosagens de misturas asfálticas utilizando-se a metodologia Superpave;
- ✓ analisar a influência de diferentes tempos, rotação e temperatura na mistura CAP e PET;
- ✓ estudar outras variações dos teores de PET para misturas asfálticas;
- ✓ executar trecho experimental usando o asfalto modificado com o PET;
- ✓ estudar, com o auxílio do procedimento SARA, a adição de PET e de Polímeros Reativos como forma de verificar e explicar o comportamento reológico em termos de “elasticidade” conferida ao CAP.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEPET- **Associação Brasileira dos Fabricantes de Embalagens de PET**, 2004 Disponível em: < www.abipet.com.br >. acesso em: 11 Jan. 2012, 15:31:41.

AHMADINIA Esmail, ZARGAR Majid, KARIM Mohamed Rehan, ABDELAZIZ Mahrez, EBRAHIM Ahmadinia. **Performance Evaluation of Utilization of Waste Polyethylene Terephthalate (PET) in Stone Mastic Asphalt**, Malaysia, 2012.

ANDERSON, D. A.; BAHIA, H. U; DONGRE, R. **Rheological properties of mineral filler-asphalt mixtures**. *Association of Asphalt Paving Technologists*, 1992. v.42, p 37-66.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**/ São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L.M .G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B., **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. Petrobras, ABEDA, Rio de Janeiro, 2007.

BRETAS, R. E. S.; D' Ávila, M. A. **Reologia de Polímeros Fundidos**. 2º ed., EdUFSCar, São Carlos, 2005.

BRINGEL, Raquel Moraes; **Estudo Químico e Reológico de Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros e Aditivos**. Dissertação apresentada na Universidade Federal do Ceará, 2007.

CARTERET, R. de, BUZZI, O., FITYUS, Stephen, and LIU Xianfeng. **Effect of Naturally Occurring Salts on Tensile and Shear Strength of Sealed Granular Road Pavements**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014.

CASTRO, Luciana Nogueira de; **Reciclagem a Frio “IN SITU” com Espuma de Asfalto**. Tese apresentada na Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

CARDOSO, Y. T. **Desenvolvimento de compósitos de poli (tereftalato de etileno) reciclado com fibras naturais**. XXXIV Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Tecnológica, Artística e Cultural. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

CLAUMANN, C. **Comportamento de Solos Siltosos quando Reforçados com Fibras e Melhorados com Aditivos Químicos e Orgânicos**. Dissertação apresentada a Universidade Federal do Paraná, 2007

CEMPRE, **Compromisso Empresarial para Reciclagem**. Disponível em: <http://www.cempre.org.br/mercado.php>. Acesso em 12/11/2012.

DIAS, Márcia Rodrigues; **Utilização de Mistura Asfáltica com Borracha pelo Processo da Via – Seca Execução de um Trecho Experimental Urbano em Porto Alegre – RS**. Dissertação apresentada na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

D 4123: 1982 DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes. **Módulo de Resiliência**. Rio de Janeiro.

D 2872: 1997 ASTM: American Society for Testing and Materials. **Envelhecimento a Curto Prazo – RTFO**.

D 4791: 2000 ASTM: **American Society for Testing and Materials. Standard test method for flat particles, elongated particles, or flat and elongated particles in coarse aggregate**. USA.

ME 148: 1994 DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes. Material Betuminoso – **Determinação do ponto de fulgor e de combustão**. Rio de Janeiro.

ME 195: 1997 DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes. **Absorção e Massa específica real dos agregados e filler**. Rio de Janeiro.

ME 78:1994 DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes. **Adesividade**. Rio de Janeiro.

ME 86: 1994 DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes. **Índice de forma**. Rio de Janeiro.

ME 89: 1994 DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes. **Durabilidade**. Rio de Janeiro.

ME 131: 2010 DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes. **Ponto de Amolecimento**. Rio de Janeiro.

ME 136: 2010 DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes. **Resistência à Tração**. Rio de Janeiro.

ME 003: 1999 DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes. Material Betuminoso – **Determinação da penetração**. Rio de Janeiro.

ME 035: 1998 DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes. Agregados – **Determinação da Abrasão Los Angeles**. Rio de Janeiro.

ME 054: 1997 DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes. **Equivalente de areia**. Rio de Janeiro.

ME 078: 1994 DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes. Agregado graúdo – **Adesividade ao ligante betuminoso**. Rio de Janeiro.

ME 083: 1998 DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes. Agregados – **Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro.

ME 117: 1994 DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes. **Mistura betuminosa - determinação da densidade aparente**. Rio de Janeiro.

ME 133: 1994 DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes. **Determinação do Módulo de Resiliência**. Rio de Janeiro.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Planos de Gestão dos Resíduos Sólidos: Manual de Orientação**. ICLEI, Brasília, Brasil, 2012.

FAXINA, A. L. **Estudo da viabilidade técnica do uso de resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligante asfalto-borracha**. 308p. Tese (Doutorado) – EESC, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

FIGUEROA-INFANTE, A. S.; FONSECA-SANTANILLA, E. B.; REYES-LIZCANO, F. A. **Caracterización físicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado**. Physicochemical and Micromorphological Evaluation of Asphalt Modified with Recycled Materials. Ing. Univ. Bogotá (Colombia), 13 (1): 45-70, enero-junio de 2009.

FRANKLIM, Tatiany Nunes; **Avaliação da Adesividade Ligante – Agregado e Misturas Asfálticas por Técnicas de Análise de Superfícies**. Dissertação apresentada na Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

HELSEN, W. F., STARKES, J. L., & HODGES, N. J. **Team sports and the theory of deliberate practice**. Journal of Sport and Exercise Psychology, 1998.

HEMPEL, C. G. **Filosofia da ciência natural**.: Zahar, Rio de Janeiro, 1981.

JO, B; TAE, G; KIM, C. **Uniaxial creep behavior and prediction of recycled-PET polymer concrete**. **Construction and Building Materials**. v. 21, p. 1552-1559, 2007. JUNG, Sung Hoon. The Effects of Asphalt Binder Oxidation on Hot Mix Asphalt Concrete Mixture Rheology and Fatigue Performance. Dissertação apresentada na Universidade do Texas, 2007.

KLEIN, C. D. F. **Síntese e Caracterização de Poliésteres Termoplásticos**. Dissertação apresentada a Universidade de Porto Alegre, 2009.

KIM, S. B.; YI, N. H.; KIM, H. Y.; KIM, J. J.; SONG, Y. **Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete**. Cement and Concrete Composites. v. 32, p. 232-240, 2010.

Huang, Y. H., **Pavement Analysis and Design**, Prentice Hall, New Jersey, 1993.

LEITE L. F. L.; TONIAL I. A.; **"Qualidade dos cimentos asfálticos brasileiros segundo as especificações SHRP"**, 12º Encontro de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo, 05 a 09 de dezembro, 1994.

LEITE, L. M. F. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros**. 1999. 266f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LIMA, Cícero de Souza; SOARES, Jorge Barbosa; TOMÉ Luisa Gardênia Alves. **Estudo das Propriedades Químicas e Reológicas Do Ligante Asfalto-Borracha**. 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Salvador, 2005.

LIMA, Cristian Kelly Moraes de; **Estudo da Incorporação de Resíduo Industrial Polimérico ao CAP**. Dissertação apresentada na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.

LING, M.; CURTIS, C. W.; HANSON, D. I.; HOLL, J. N., **"Quantitative Analysis of Polymers and Crumb Rubber in Hot-Mix Asphalts"**. In: Transportation Research Record, no 1586, pp 57-67, TRB, Washington, DC, 1997.

MASHAAN, Nuha Salim, ALI, Asim Hassan, KARIM, Mohamed Rehan, ABDELAZIZ Mahrez. **A Review on Using Crumb Rubber in Reinforcement of Asphalt Pavement**, Center for Transportation Research, Faculty of Engineering, University of Malaya, 2014.

MEDINA, Jacques de. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997.

MENDES, Celso Braúlio Alves. **Asfalto Borracha - Minimizando os Impactos Ambientais Gerados pelo Descarte de Pneus Inservíveis no Meio Ambiente**. Vitória: UNIVIX, 2009. 73 p.

MENEGUINI, Eduardo César Antonelli; **Avaliação de Concreto Asfáltico com Incorporação de Pó de Borracha Reciclada de Pneus, Tratada Superficialmente com Hidróxido de Sódio Comercial**. Tese Apresentada na Universidade Estadual de Campinas, 2011.

MOTHÉ, Michelle Gonçalves; **Estudo do Comportamento de Ligantes Asfálticos por Reologia e Análise Térmica**. Dissertação apresentada na Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

NEGRÃO, Douglas Polcaro; **Estudo de Asfaltos Modificados por Polímeros do Tipo RET para Aplicações em Pavimentos**. Dissertação apresentada na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

NBR 15184: 2005 ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Viscosidade Aparente Brookfield**, Rio de Janeiro.

NBR 9935: 2005 ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados: Terminologia**. Rio de Janeiro.

MB 517: 1989 ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Viscosidade Saybolt Furol**, Rio de Janeiro.

OCHI, T; OKUBO, S.; FUKUI, K. **Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber**. Cement & Concrete Composites. v. 29, p. 448-455, 2007.

ODA, Sandra; **Análise da Viabilidade Técnica da Utilização Asfalto-Borracha em Obras de Pavimentação**. Tese apresentada na Universidade de São Paulo, 2000.

PIZZORNO, Bianca de Sousa; **Efeito do Solvente e da Temperatura na morfologia superficial do Cimento Asfáltico de Petróleo**. Dissertação apresentada na Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

QIN Qian, SCHABRON John F., Ryan B. BOYSEN, FARRAR Michael J. **Field aging effect on chemistry and rheology of asphalt binders and rheological predictions for field aging**. Western Research Institute, 365 N 9th Street, Laramie, WY 82072, United States, 2013.

RABELLO, M.S., WELLEN, R. M. R. **Estudo da cristalização a frio do poli (tereftalato de etileno) (PET) para produção de embalagens**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2008.

REVISTA MEIO AMBIENTE, **Sem Reciclagem, Brasil Descarta 4,7 bi de Garrafas PET na Natureza**. Disponível em: < <http://www.revistameioambiente.com.br> > Acesso em: 21 Dez. 2013, 16:54:11.

ROBERTS, F.L., KANDHAL PS, BROWN ER, Lee D-Y, KENNEDY TW. **Hot mix asphalt materials, mixture design and construction**, 2nd ed. Lanham, MD, NAPA Research and Education Foundation, 1996.

RODRIGUES, L. S.; SÁ DA COSTA, K. J.; VASCONCELOS, R. P.; VIEIRA, R. K.; SÁ, R. J. **Utilização do resíduo sólido pet (polietileno tereftalato) na fabricação de blocos de concreto estrutural para pavimentos rígidos**. In: 18º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2008, Porto de Galinhas. Anais do 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2008.

RUDIO, Franz Victor. **Introdução ao projeto de pesquisa científica**. 25. ed. Petrópolis: Vozes, 1999.

SHENOY, A. **Unifying asphalt rheological data using the material's volumetric-flow rate**. ASCE. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 13, p.260 – 273, 2001.

SILVA, José de Arimateia Almeida e; **Estudo das Propriedades Físicas, de Estado e Mecânicas de Misturas Asfálticas para os Revestimentos de Pistas de Aeródromos**. Dissertação apresentada na Universidade Federal de Campina Grande, 2011.

SOUZA, M., V., R., **Efeito de Fibras Sintéticas nas Propriedades de Ligantes e Concretos Asfálticos**. Dissertação apresentada na Universidade de Brasília, 2010.

SOUZA. J., K., D. , **Síntese de Catalisadores Utilizando Garrafa Pet Para a Produção de Biodiesel**. Dissertação Apresentada a Universidade Federal da Paraíba. UFPB, 2012

TANGELLA, S. C. S.; CRAUS J., **DEACOM, J. A. ; MONISMITH, C. L. Summary Report on Fatigue response of Asphalt Mixtures**. SHPR. Berkeley, 1990.

TAREFDER Rafiqul A., ZAMAN Arif M. **Nanoscale Evaluation of Moisture Damage in Polymer Modified Asphalts**. Journal of Materials in Civil Engineering. México, 2010.

THEISEN, Klaus Machado; **Aplicação do Princípio da Correspondência Elasto-Viscoelástica para Previsão de Deformabilidade de Misturas Asfálticas**. Dissertação apresentada na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

T 283 – 02: AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials. **Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage**, 2012

VANINI, G., FILHO, E., A., S., **Reciclagem do PET por despolimerização em meio alcalino na presença do tensoativo CTAB e comparação com o Método Petretec**. Universidade Federal do Espírito Santo. 2010.

YAO Hui, YOU Zhanping, LI Liang , GOH Shu Wei, LEE Chee Huei , YAP Yoke Khin, SHI. Xianming. **Rheological properties and chemical analysis of nanoclay and carbon microfiber modified asphalt with Fourier transform infrared spectroscopy**. Construction and Building Materials 327–337, 2013.

ZANZOTTO, L.; KENNEPOHL, G.J.; **Development of Rubber and Asphalt Binder by Depolymerization and Devulcanization of Scrap Tires in Asphalt.** Transportation Research Record 1530. P. 51-58. 1996.

ZHU Xiao-qing; Lu Can-hui²; Liang Mei. **Rheological Property of Bitumen Modified by the Mixture of the Mechanochemically Devulcanized Tire Rubber Powder and SBS.** Journal Of Materials In Civil Engineering / November 2009.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Módulo de Resiliência para o CAP Puro, com 4%, 5%, 6% e CAP Modificado

Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvs only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\Armatela\Armatela 2012\Doutorado\ENSAIOS\Análise das Propriedades Mecânicas\CAP Puro\Módulo de Resiliência\Ca

Template file name: 122

Test date & time: 24/7/2012 14:55:29

Project: Armatela

Operator: Leda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25

Loading pulse width (ms): 100

Pulse repetition period (ms): 1000

Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1299

Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CAP PURO 2

Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Average	Std Dev
Length (mm)	63,6	63,6	66,6			64,8	1,7
Diameter (mm)	99,8	99,8	100,0			99,9	0,1

Cross-sectional area (mm²): 7833,1

Test Results

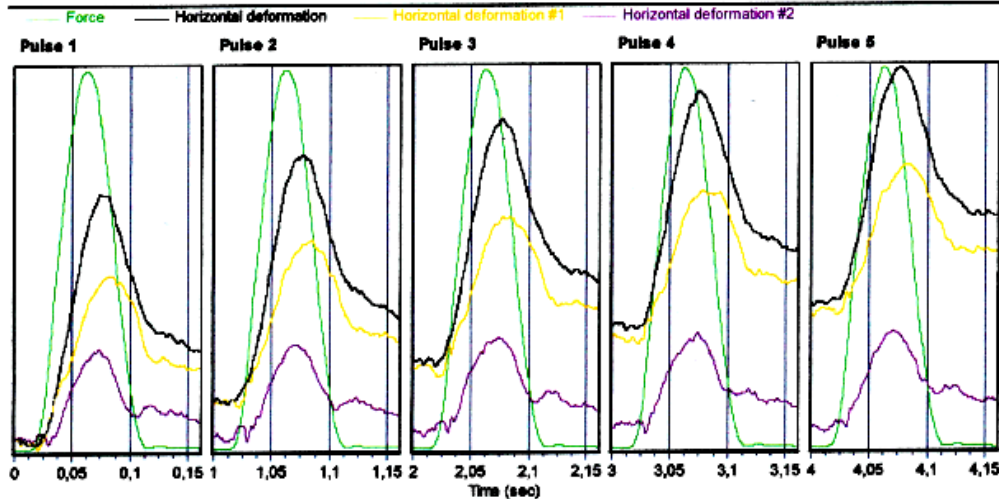
Conditioning pulses: 5

Perm's horiz'l defn/pulse (µm): 0,487700

Core temperature (°C): 29,4

Skin temperature (°C): 28,4

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	8337	8350	8270	8097	8092	8229	113,21	1,38
Total recoverable horiz. deform. (µm)	1,81	1,81	1,83	1,66	1,67	1,84	0,02	1,53
Peak loading force (N)	1296	1297	1296	1300	1300	1297	2,07	0,16
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	0,84	0,87	0,93	0,94	0,94	0,94	0,02	1,73
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	0,87	0,84	0,70	0,73	0,73	0,89	0,03	4,98
Seating force (N)	131	130	131	130	131	130	0,28	0,21



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. loads only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: C:\Armatela\Armatela 2012\Doutorado\ENSAIOS\Análise das Propriedades Mecânicas\CAP PURO\Módulo de Resiliência\Cs
 Template file name: 122
 Test date & time: 24/7/2012 14:54:38
 Project: Armatela
 Operator: Leda
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1299
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CAP PURO 2
 Remarks...

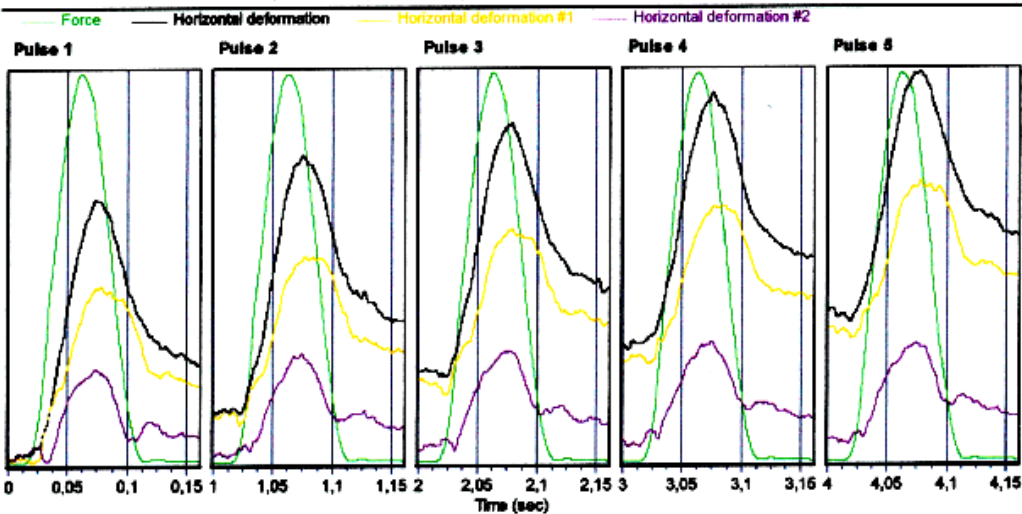
Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	63,6	63,6	66,8				64,6	1,7
Diameter (mm)	99,8	99,8	100,0				99,8	0,1
Cross-sectional area (mm²): 7833,1								

Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm'1 horiz1 defn/pulse (µm): 0,521000

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	8208	8034	7911	7995	8067	8047	96,35	1,22
Total recoverable horiz. deform. (µm)	1,65	1,69	1,71	1,69	1,67	1,68	0,02	1,18
Peak loading force (N)	1304	1299	1302	1300	1299	1301	2,12	0,16
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	0,98	0,93	1,02	0,94	0,96	0,97	0,03	3,38
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	0,67	0,76	0,69	0,75	0,71	0,71	0,03	4,62
Seating force (N)	130	130	130	130	130	130	0,32	0,25



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. ndts only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: H:\CP4 - CAP PET.D003
 Template file name: 122
 Test date & time: 15/8/2012 09:20:45
 Project: Arimateia
 Operator: Leda
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 629
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CP4 - CAP PET
 Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	78,7	79,0	78,0				79,2	0,4
Diameter (mm)	100,3	100,4	100,3				100,4	0,1

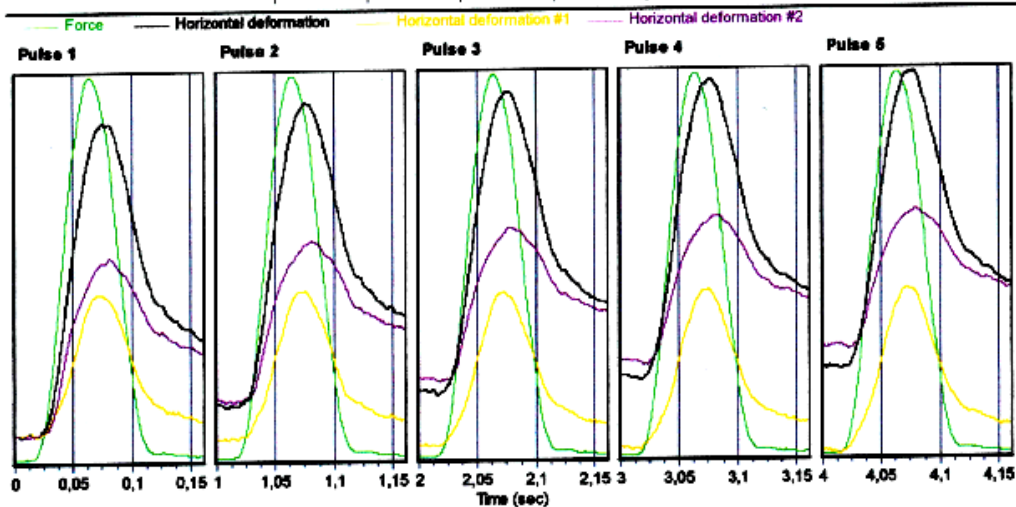
Cross-sectional area (mm²): 7909,1

Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l defn/pulse (µm): 0,373900

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	1413	1378	1401	1385	1379	1381	13,79	0,99
Total recoverable horiz. deform. (µm)	3,77	3,86	3,80	3,84	3,86	3,83	0,03	0,90
Peak loading force (N)	631	629	630	629	629	630	0,62	0,10
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,94	2,07	2,02	2,13	2,18	2,07	0,09	4,15
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,84	1,79	1,78	1,71	1,67	1,76	0,06	3,36
Seating force (N)	63	63	63	63	63	63	0,19	0,31



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvs only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: H:\CP3 - CAP PET.D003
 Template file name: 122
 Test date & time: 15/6/2012 06:59:42
 Project: Arimateale
 Operator: L&da
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 50

Peak loading force (N): 629
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CP3 - CAP PET
 Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	78,0	78,5	79,1				78,8	0,3
Diameter (mm)	100,5	100,4	100,6				100,5	0,1

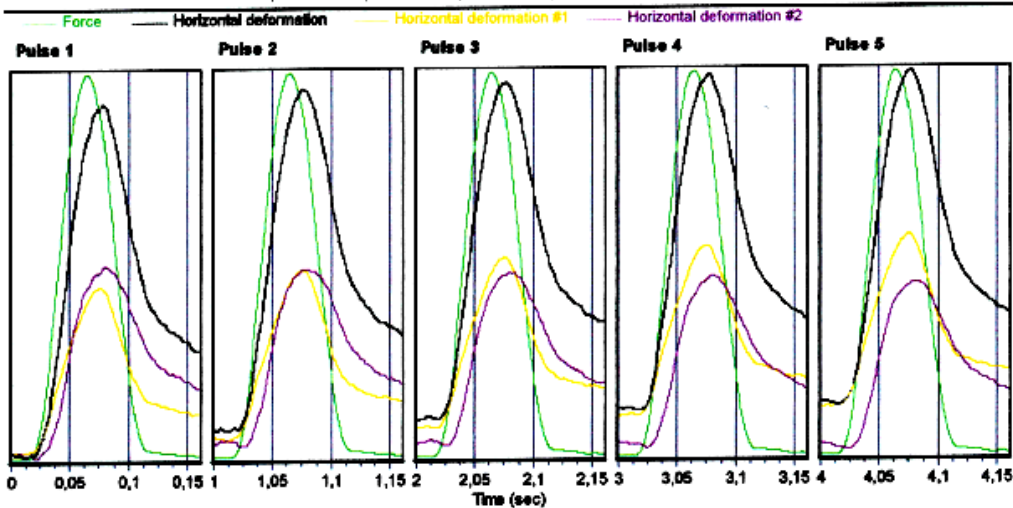
Cross-sectional area (mm²): 7932,7

Test Results

Conditioning pulses: 50
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm'l horiz'l defn/pulse (µm): 0,368700

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	918	899	914	911	914	911	6,77	0,74
Total recoverable horiz. deform. (µm)	5,82	5,95	5,85	5,85	5,85	5,87	0,04	0,72
Peak loading force (N)	629	629	629	629	630	629	0,32	0,05
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	2,67	2,83	2,84	2,85	2,89	2,82	0,08	2,78
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	3,15	3,12	3,01	2,99	2,96	3,04	0,07	2,46
Seating force (N)	63	63	63	63	63	63	0,07	0,11



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvs only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: C:\Armatela\Armatela 2012\Doctorado\ENSAIOS\Análise das Propriedades Mecânicas e Volumétricas\Variando o % de PE
 Template file name: 122
 Test date & time: 24/9/2012 15:47:10
 Project: Armatela
 Operator: Leda
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1160
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CP 5 - 2,5% PET agregado
 Remarks:

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	65,9	65,7	65,9				65,8	0,1
Diameter (mm)	99,9	99,9	99,7				99,8	0,1

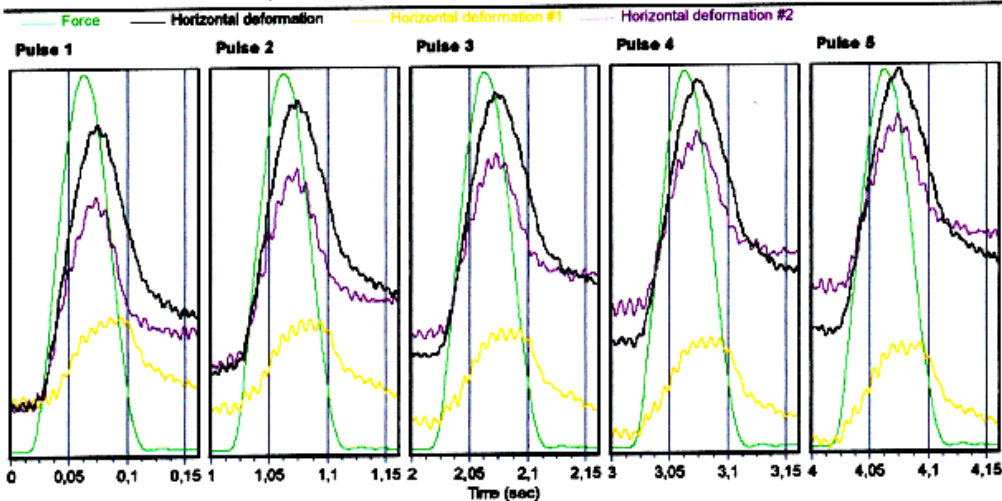
Cross-sectional area (mm²): 7827,8

Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l def'n/pulse (µm): 0,339500

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	4239	4151	4244	4262	4187	4216	41,47	0,98
Total recoverable horiz. deform. (µm)	2,78	2,84	2,78	2,77	2,82	2,79	0,03	0,97
Peak loading force (N)	1156	1157	1158	1158	1158	1157	0,76	0,07
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	0,96	1,03	1,09	1,05	1,12	1,05	0,06	5,53
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,83	1,81	1,69	1,72	1,70	1,75	0,06	3,38
Seating force (N)	116	116	115	116	116	116	0,30	0,26



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvs only, assumed Poisson's ratio)

Data file Name: C:\Arimateia\Arimateia 2012\Doctorado\ENSAIOS\Análise das Propriedades Mecânicas e Volumétricas\Variando o % de PE

Template file name: 122

Test date & time: 24/8/2012 15:47:44

Project: Arimateia

Operator: Leda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
Loading pulse width (ms): 100
Pulse repetition period (ms): 1000
Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1160
Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CP 5 - 2,5% PET agregado
Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	65,8	65,7	65,9				65,8	0,1
Diameter (mm)	99,9	99,9	99,7				99,8	0,1

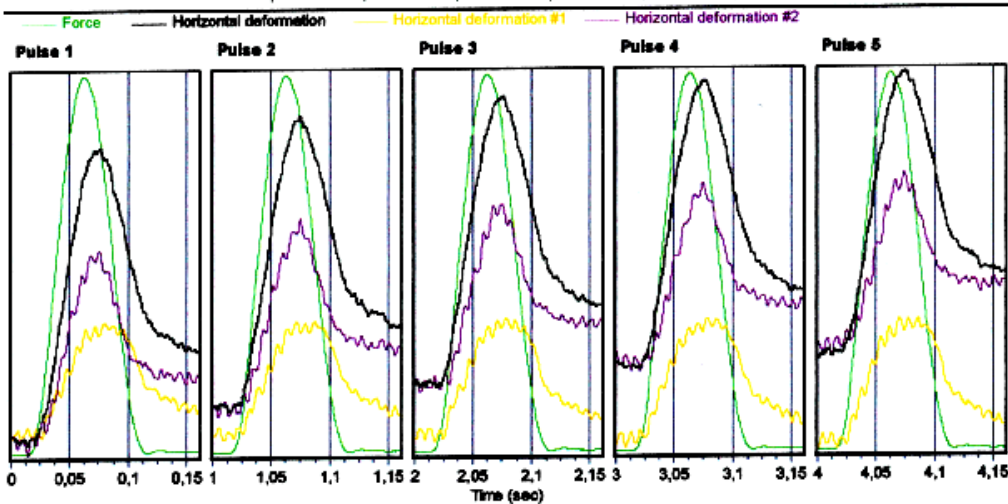
Cross-sectional area (mm²): 7827,8

Test Results

Conditioning pulses: 5
Core temperature (°C): 29,4
Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l def'n/pulse (µm): 0,375100

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	4687	4536	4545	4370	4588	4547	105,63	2,32
Total recoverable horiz. deform. (µm)	2,51	2,50	2,59	2,70	2,57	2,50	0,08	2,35
Peak loading force (N)	1159	1160	1156	1160	1160	1160	0,80	0,07
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	0,99	1,03	1,17	1,17	1,20	1,11	0,08	7,39
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,52	1,57	1,43	1,54	1,36	1,49	0,07	4,83
Seating force (N)	116	116	115	115	115	116	0,21	0,18



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. loads only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\Armatex\Armatex 2012\Doutorado\ENSAIOS\Análise das Propriedades Mecânicas e Volumétricas\Variando o % de PE

Template file name: 122

Test date & time: 24/9/2012 15:57:42

Project: Armatex

Operator: Lóda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25

Loading pulse width (ms): 100

Pulse repetition period (ms): 1000

Conditioning pulse count: 50

Peak loading force (N): 1020

Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CP 5 - 5,0% PET agregado

Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	68,1	67,9	68,1				68,0	0,1
Diameter (mm)	99,9	99,8	100,0				99,9	0,1

Cross-sectional area (mm²): 7833,1

Test Results

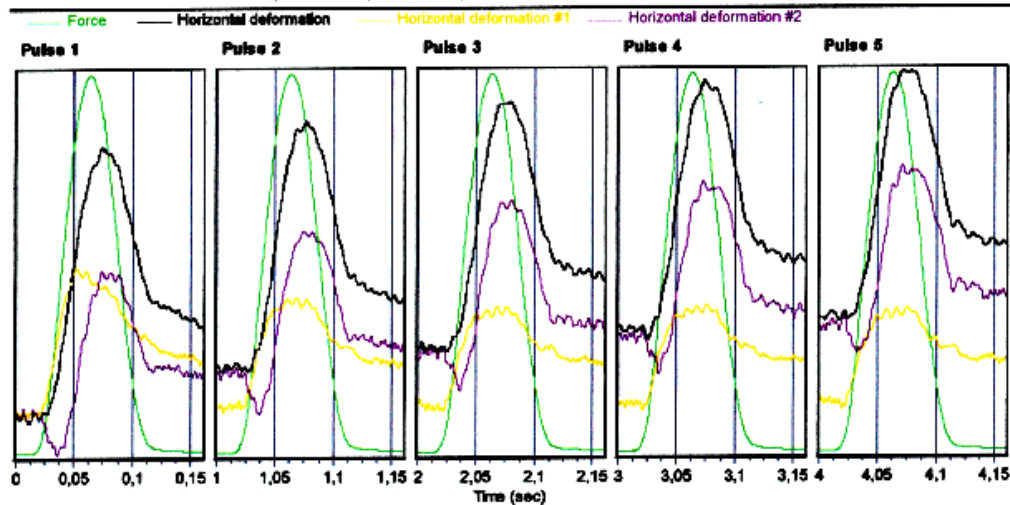
Conditioning pulses: 50

Core temperature (°C): 29,4

Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l def'n/pulse (µm): 0,526900

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	3747	3605	3680	3480	3562	3615	92,61	2,58
Total recoverable horiz. deform. (µm)	2,68	2,78	2,73	2,89	2,82	2,78	0,07	2,57
Peak loading force (N)	1020	1018	1019	1020	1019	1019	0,53	0,05
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,44	1,28	1,06	1,13	1,05	1,19	0,14	12,17
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,24	1,52	1,66	1,76	1,76	1,59	0,19	12,26
Seating force (N)	102	102	102	101	102	101	0,30	0,29



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. vols only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\Arimateia\Arimateia 2012\Doutorado\ENSAIOS\Análise das Propriedades Mecânicas e Volumétricas\Variando o % de PE

Template file name: 122

Test date & time: 24/8/2012 15:01:39

Project: Arimateia

Operator: Léda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25

Loading pulse width (ms): 100

Pulse repetition period (ms): 1000

Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1020

Estimated Poisson's ratio: 0.4

Sealing force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CP 5 - 5,0% PET agregado

Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	68,1	67,9	68,1				68,0	0,1
Diameter (mm)	99,9	99,8	100,0				99,9	0,1
Cross-sectional area (mm²): 7833,1								

Test Results

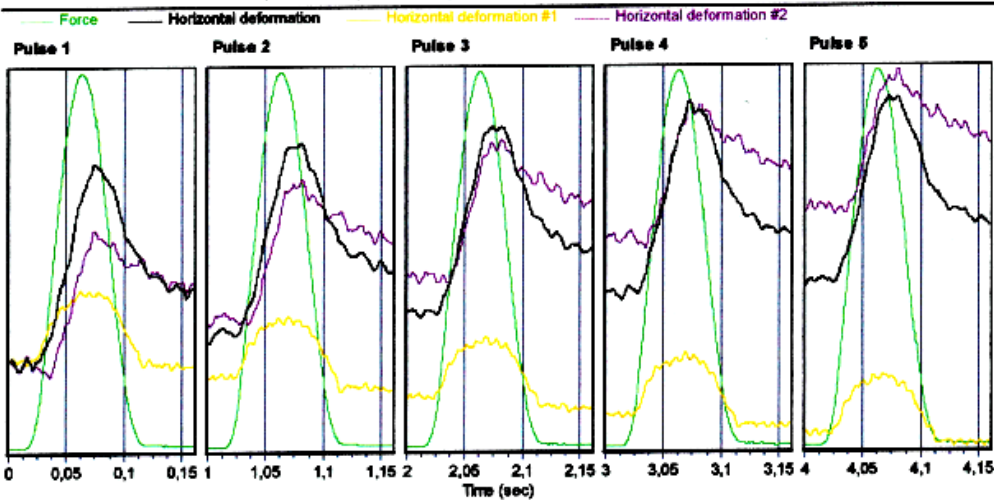
Conditioning pulses: 5

Perm'l horiz'l defn/pulse (µm): 0,448300

Core temperature (°C): 29,4

Skin temperature (°C): 29,4

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	4742	5042	5130	4622	5045	4916	197,33	4,01
Total recoverable horiz. deform. (µm)	2,12	1,99	1,96	2,17	1,99	2,05	0,06	4,07
Peak loading force (N)	1020	1021	1019	1019	1019	1020	0,51	0,05
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,00	0,87	0,83	0,85	0,81	0,87	0,07	7,81
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,12	1,13	1,13	1,32	1,18	1,16	0,07	6,36
Sealing force (N)	102	102	102	102	102	102	0,28	0,28



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lnds only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: C:\Arimateia\Arimateia 2012\Doutorado\ENSAIOS\Análise das Propriedades Mecânicas e Volumétricas\Variando o % de PE
 Template file name: 122
 Test date & time: 24/9/2012 16:05:53
 Project: Arimateia
 Operator: Lúcia
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 50

Peak loading force (N): 840
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CP - 7,5% PET agregado
 Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	69,7	70,0	70,5				70,1	0,4
Diameter (mm)	99,8	99,9	100,0				99,9	0,1

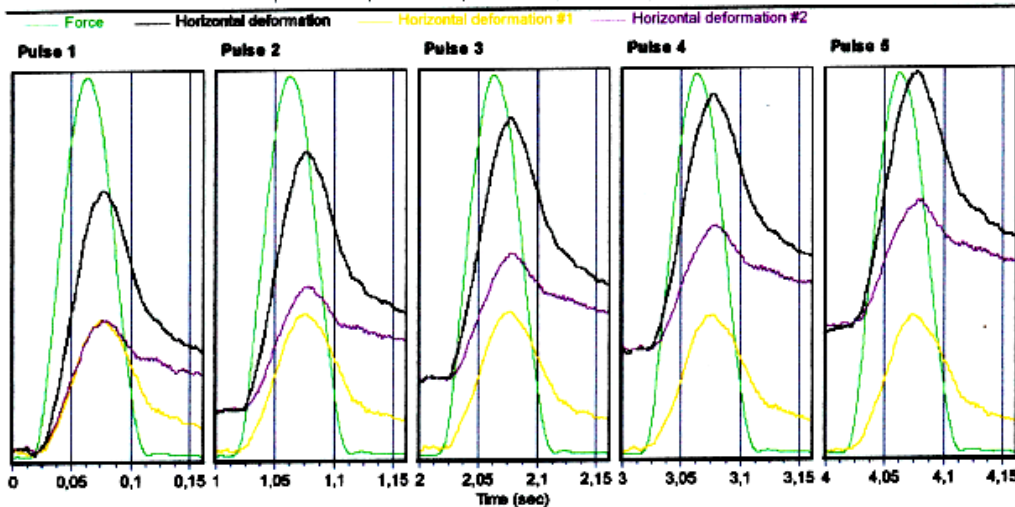
Cross-sectional area (mm²): 7835,7

Test Results

Conditioning pulses: 50
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz1 defn/pulse (µm): 0,686300

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	3018	2895	2852	2814	2904	2897	69,02	2,38
Total recoverable horiz. deform. (µm)	2,67	2,78	2,82	2,86	2,78	2,78	0,08	2,33
Peak loading force (N)	842	841	841	842	843	842	0,85	0,08
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,57	1,85	1,88	1,57	1,82	1,64	0,04	2,43
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,09	1,13	1,13	1,19	1,15	1,14	0,03	2,70
Seating force (N)	84	83	84	84	84	84	0,48	0,55



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. hds only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\Armatela\Armatela 2012\Doutorado\ENSAIOS\Análise das Propriedades Mecânicas e Volumétricas\Variando o % de PE

Template file name: 122

Test date & time: 24/9/2012 16:07:12

Project: Armatela

Operator: Leda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
Loading pulse width (ms): 100
Pulse repetition period (ms): 1000
Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 840
Estimated Poisson's ratio: 0.4

Sealing force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CP - 7,5% PET agregado
Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	89,7	70,0	70,5				70,1	0,4
Diameter (mm)	99,5	99,9	100,0				99,9	0,1

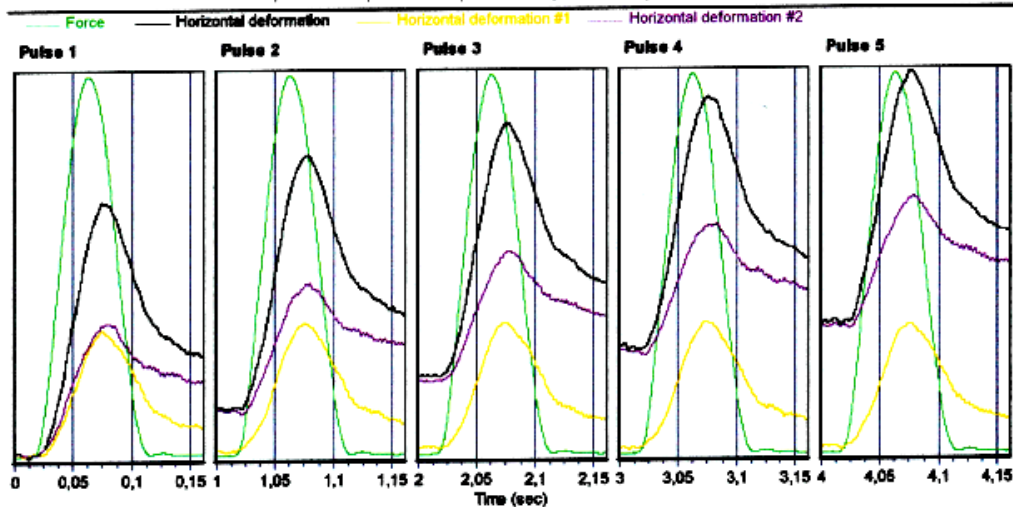
Cross-sectional area (mm²): 7835,7

Test Results

Conditioning pulses: 5
Core temperature (°C): 29,4
Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l defn/pulse (µm): 0,741700

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	3198	2956	2913	2888	2881	2967	117,71	3,97
Total recoverable horiz. deform. (µm)	2,50	2,71	2,75	2,76	2,78	2,70	0,10	3,85
Peak loading force (N)	838	837	837	838	838	837	0,71	0,09
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,48	1,53	1,54	1,55	1,49	1,51	0,03	2,08
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,04	1,18	1,21	1,23	1,29	1,19	0,08	6,98
Sealing force (N)	84	84	83	84	84	84	0,35	0,42



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. loads only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: C:\Arimateia\Arimateia 2012\Doutorado\ENSAIOS\Análise das Propriedades Mecânicas e Volumétricas\Variando o % de PE
 Template file name: 122
 Test date & time: 24/9/2012 16:28:39
 Project: Arimateia
 Operator: Leda
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 50

Peak loading force (N): 740
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CP - 10% PET agregado
 Remarks:

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	72,0	72,1	72,2				72,1	0,1
Diameter (mm)	100,0	100,0	100,0				100,0	0,0

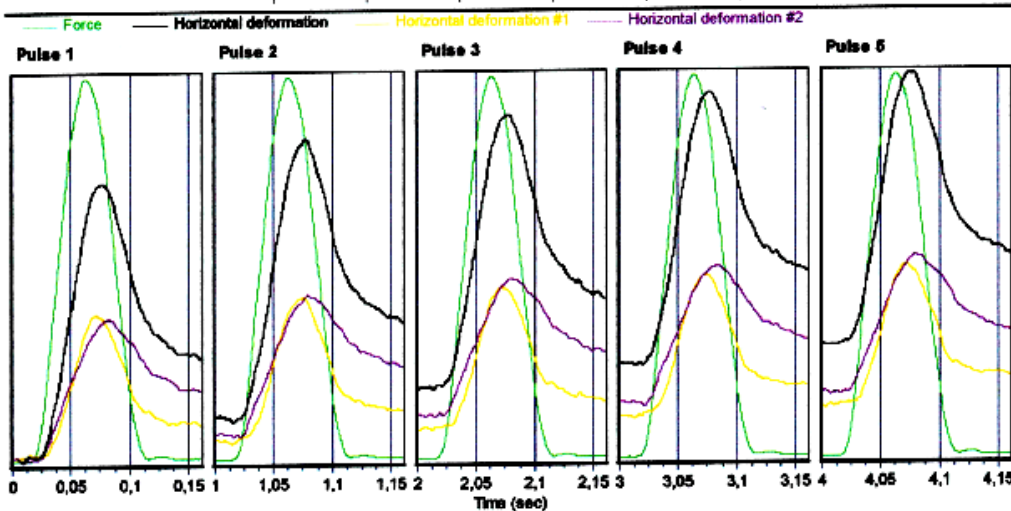
Cross-sectional area (mm²): 7851,4

Test Results

Conditioning pulses: 50
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l defn/pulse (µm): 0,661300

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	2272	2129	2139	2114	2110	2153	60,56	2,81
Total recoverable horiz. deform. (µm)	3,02	3,23	3,21	3,25	3,26	3,19	0,09	2,70
Peak loading force (N)	740	740	739	740	739	740	0,33	0,04
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,57	1,70	1,62	1,66	1,67	1,64	0,06	2,67
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,46	1,53	1,59	1,59	1,58	1,55	0,05	3,32
Seating force (N)	74	74	74	73	74	74	0,28	0,36



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. Indis only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: C:\Arimateia\Arimateia 2012\Doutorado\ENSAIOS\Análise das Propriedades Mecânicas e Volumétricas\Variando o % de PE
 Template file name: 122
 Test date & time: 24/9/2012 16:30:01
 Project: Arimateia
 Operator: Lúcia
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 50

Peak loading force (N): 740
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CP - 10% PET agregado
 Remarks:

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	72,0	72,1	72,2				72,1	0,1
Diameter (mm)	100,0	100,0	100,0				100,0	0,0

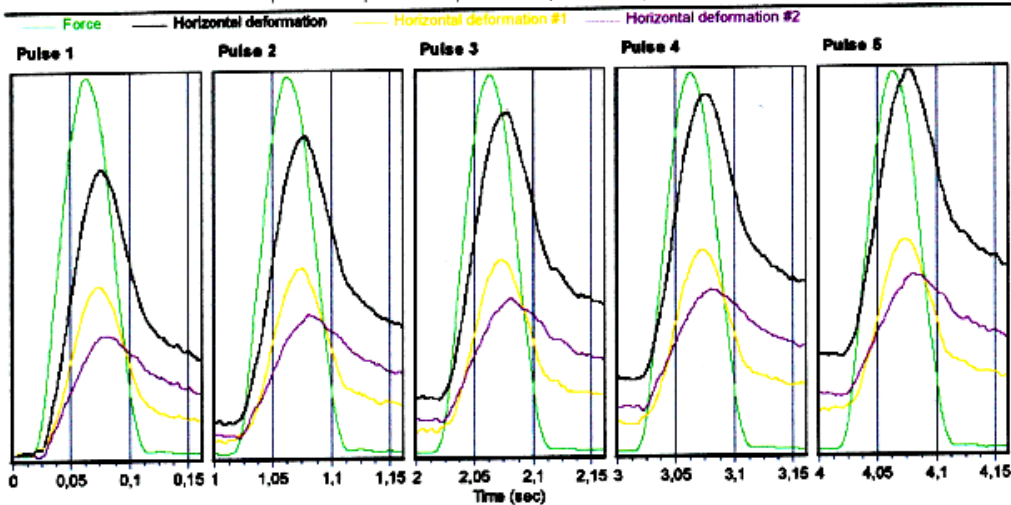
Cross-sectional area (mm²): 7851,4

Test Results

Conditioning pulses: 50
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l def'n/pulse (µm): 0,528900

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	2204	2125	2086	2138	2081	2125	47,77	2,25
Total recoverable horiz. deform. (µm)	3,13	3,24	3,28	3,21	3,33	3,24	0,07	2,15
Peak loading force (N)	741	740	740	739	739	740	0,70	0,09
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,91	2,01	1,96	1,97	1,97	1,96	0,03	1,84
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,22	1,23	1,32	1,24	1,37	1,28	0,06	4,84
Seating force (N)	74	74	74	74	74	74	0,31	0,42



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. loads only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: C:\Armatela\Armatela 2012\Boutorad\ENSAIOS\Análise das Propriedades Mecânicas e Volumétricas\Variando o % de PE
 Template file name: 122
 Test date & time: 24/9/2012 16:40:59
 Project: Armatela
 Operator: Lida
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 610
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CP - 12,5% PET agregado
 Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	74,3	74,9	74,8				74,7	0,3
Diameter (mm)	100,0	100,0	99,5				99,8	0,3

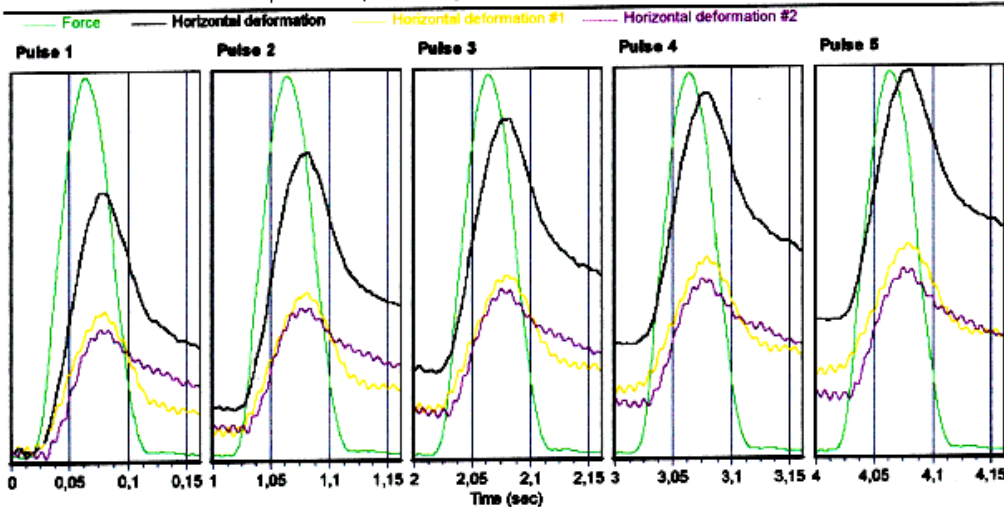
Cross-sectional area (mm²): 7827,8

Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l defn/pulse (µm): 0,937400

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	1632	1612	1580	1563	1584	1584	31,78	2,00
Total recoverable horiz. deform. (µm)	3,37	3,41	3,52	3,53	3,51	3,47	0,07	1,94
Peak loading force (N)	612	613	612	612	611	612	0,45	0,07
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,89	1,87	1,83	1,83	1,72	1,83	0,06	3,16
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,48	1,54	1,69	1,70	1,79	1,64	0,11	6,91
Seating force (N)	61	61	61	61	61	61	0,19	0,32



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. Indis only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: C:\Arimateia\Arimateia 2012\Doctorado\ENSAIOS\Análise das Propriedades Mecânicas e Volumétricas\Variando o % de PE
 Template file name: 122
 Test date & time: 24/9/2012 16:41:33
 Project: Arimateia
 Operator: Lêda
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5
 Peak loading force (N): 610
 Estimated Poisson's ratio: 0.4
 Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CP - 12,5% PET agregado
 Remarks...

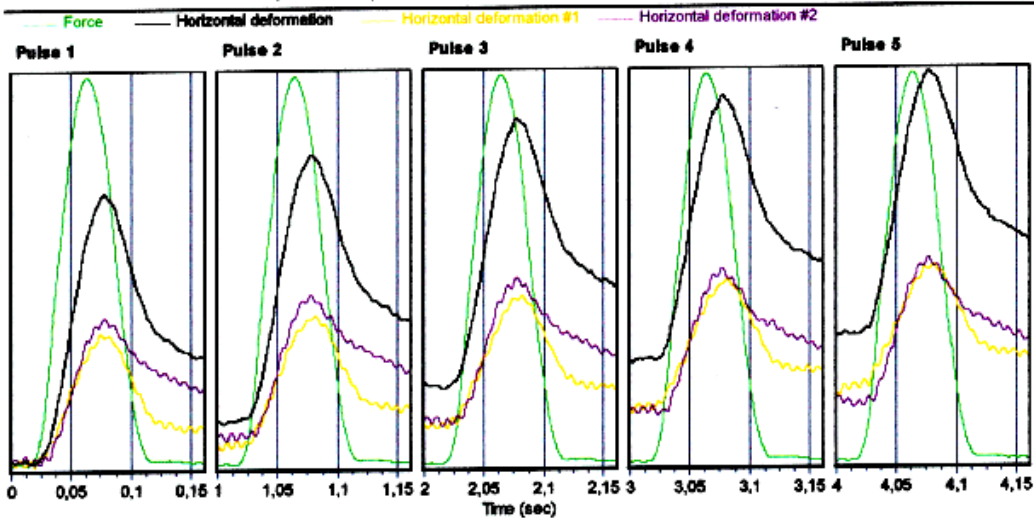
Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	74,3	74,9	74,8				74,7	0,3
Diameter (mm)	100,0	100,0	99,5				99,8	0,3

Cross-sectional area (mm²): 7827,8

Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4
 Perm't horizl def'n/pulse (µm): 0,627600

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	1656	1648	1547	1574	1557	1597	46,36	2,90
Total recoverable horiz. deform. (µm)	3,30	3,32	3,53	3,47	3,51	3,43	0,10	2,87
Peak loading force (N)	609	610	609	609	610	609	0,06	0,09
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,58	1,52	1,61	1,59	1,53	1,57	0,03	2,17
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	1,72	1,80	1,92	1,88	1,98	1,86	0,09	4,93
Seating force (N)	61	61	61	61	61	61	0,12	0,20



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. India only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\Arimateia\Arimateia 2012\Doutorado\ENSAIOS\Análise das Propriedades Mecânicas e Volumétricas\5% de CAP ao Ligar

Template file name: 122

Test date & time: 24/9/2012 15:28:42

Project: Arimateia

Operator: Lida

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25

Loading pulse width (ms): 100

Pulse repetition period (ms): 1000

Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1350

Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CP 2 - 5% PET ligante

Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	64,3	64,5	64,8				64,6	0,3
Diameter (mm)	99,7	99,8	99,7				99,7	0,1
Cross-sectional area (mm²): 7812,1								

Test Results

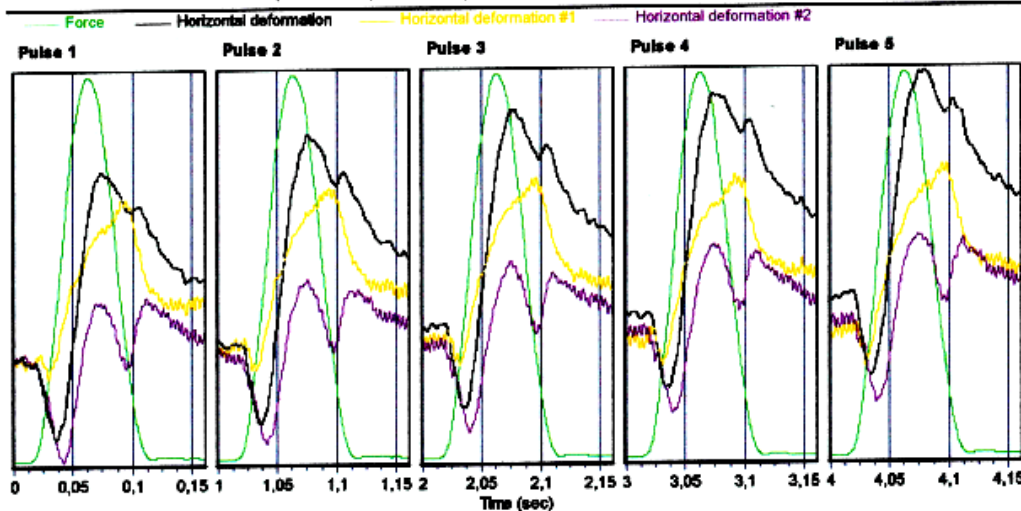
Conditioning pulses: 5

Perm't horiz't def'n/pulse (µm): 0,189900

Core temperature (°C): 29,4

Skin temperature (°C): 29,4

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	13168	11501	10952	10731	10620	11394	937,23	8,23
Total recoverable horiz. deform. (µm)	1,07	1,22	1,28	1,31	1,32	1,24	0,09	7,52
Peak loading force (N)	1352	1350	1350	1352	1350	1351	0,85	0,06
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	0,75	0,82	0,86	0,82	0,83	0,84	0,06	7,06
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	0,31	0,39	0,42	0,49	0,39	0,40	0,06	14,26
Seating force (N)	136	135	136	136	135	135	0,24	0,18



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvs only, assumed Poisson's ratio)

Data file name: C:\Arimateia\Arimateia 2012\Doutorado\ENSAIOS\Análise das Propriedades Mecânicas e Volumétricas\5% de CAP ao Liger

Template file name: 122

Test date & time: 24/8/2012 15:27:16

Project: Arimateia

Operator: Lâda

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25

Loading pulse width (ms): 100

Pulse repetition period (ms): 1000

Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1350

Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CP 2 - 5% PET ligante

Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	64,3	64,5	64,8				64,6	0,3
Diameter (mm)	99,7	99,8	99,7				99,7	0,1

Cross-sectional area (mm²): 7812,1

Test Results

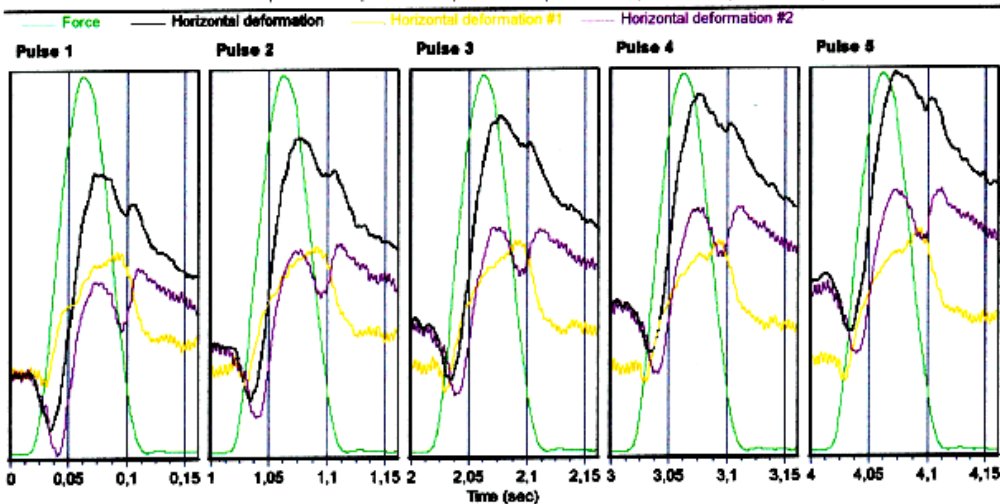
Conditioning pulses: 5

Perm'l horiz'l defn/pulse (µm): 0,323300

Core temperature (°C): 29,4

Skin temperature (°C): 29,4

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	10791	10027	9814	9604	9630	10013	409,02	4,08
Total recoverable horiz. deform. (µm)	1,30	1,40	1,43	1,43	1,45	1,40	0,05	3,91
Peak loading force (N)	1349	1351	1351	1349	1349	1350	0,90	0,07
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	0,78	0,80	0,85	0,78	0,80	0,80	0,03	3,17
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	0,52	0,60	0,58	0,65	0,65	0,60	0,05	7,93
Seating force (N)	135	134	135	135	135	135	0,36	0,26



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvdts only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: H:\Arimateia\CP 4% ligante - 2 leitura.D003
 Template file name: 122
 Test date & time: 6/2/2013 15:58:28
 Project: Arimateia
 Operator: Lóda
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1306
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CP 4% 5
 Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	64,3	64,5	64,5	64,2			64,4	0,2
Diameter (mm)	99,7	99,8	99,8	99,8			99,7	0,1

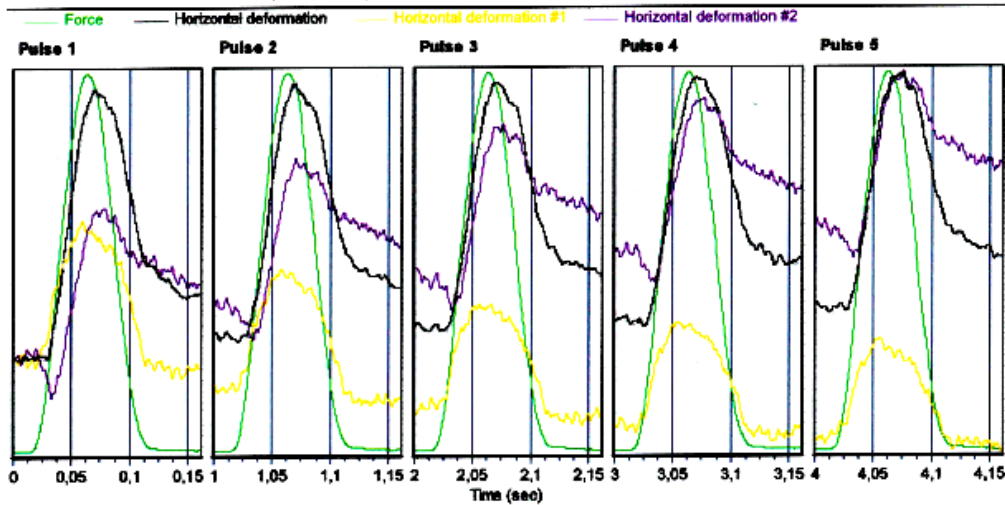
Cross-sectional area (mm²): 7810,8

Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l defn/pulse (µm): 0,162000

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	8016	8070	8207	8675	8687	8331	292,48	3,51
Total recoverable horiz. deform. (µm)	1,69	1,68	1,66	1,57	1,56	1,63	0,06	3,48
Peak loading force (N)	1304	1305	1306	1306	1303	1305	1,17	0,09
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,05	0,82	0,79	0,75	0,66	0,83	0,14	16,64
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	0,64	0,76	0,87	0,82	0,91	0,80	0,09	11,59
Seating force (N)	131	130	130	129	131	130	0,48	0,37



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. hds only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: H:\Arimatea\CP 4% 5.D003
 Template file name: 122
 Test date & time: 6/2/2013 15:53:58
 Project: Arimatea
 Operator: Léda
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5
 Peak loading force (N): 1306
 Estimated Poisson's ratio: 0.4
 Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: CP 4% 5
 Remarks...

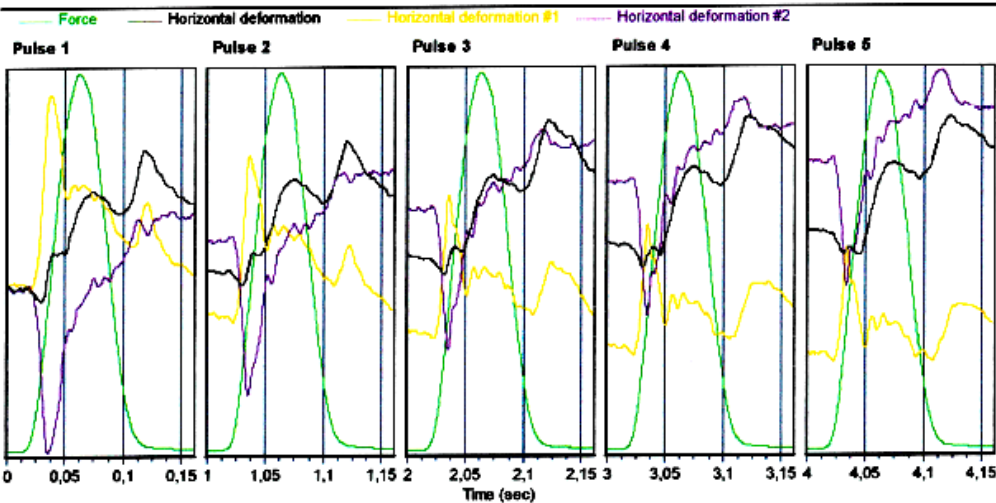
Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	64,3	64,5	64,5	64,2			64,4	0,2
Diameter (mm)	99,7	99,6	99,8	99,8			99,7	0,1

Cross-sectional area (mm²): 7810,8

Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 28,4
 Perm't horiz defn/pulse (µm): 0,334400

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	8621	9086	8459	8143	10132	9088	584,10	6,43
Total recoverable horiz. deform. (µm)	1,58	1,50	1,61	1,49	1,35	1,51	0,09	6,13
Peak loading force (N)	1309	1310	1308	1308	1309	1309	0,64	0,05
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,42	1,06	1,06	0,79	0,69	1,00	0,26	25,44
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	0,16	0,44	0,55	0,70	0,66	0,50	0,19	38,53
Seating force (N)	132	130	131	131	131	131	0,48	0,36



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvds only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: H:\Arimateia\6% ligante CP 1 - 2\Ictura.D003
 Template file name: 122
 Test date & time: 8/2/2013 16:22:53
 Project: Arimateia
 Operator: Lida
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1528
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Sealing force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: 6% ligante CP 1
 Remarks...

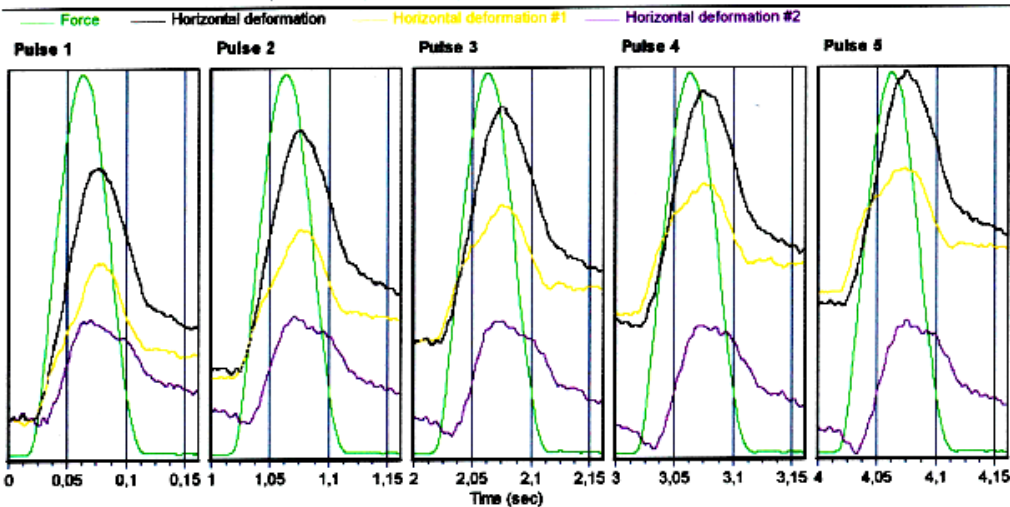
Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	64,5	64,8	64,3	64,3			64,4	0,2
Diameter (mm)	99,8	99,9	99,8	100,0			99,9	0,1
Cross-sectional area (mm²): 7836,3								

Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horizl defn/pulse (µm): 0,588500

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	7184	6881	6873	6836	6888	6927	120,59	1,74
Total recoverable horiz. deform. (µm)	2,21	2,31	2,30	2,32	2,30	2,29	0,04	1,75
Peak loading force (N)	1521	1523	1521	1523	1526	1523	1,77	0,12
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,26	1,25	1,17	1,20	1,16	1,21	0,04	3,17
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	0,95	1,06	1,13	1,12	1,14	1,08	0,07	6,48
Sealing force (N)	154	153	153	153	152	153	0,41	0,27



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvs only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: H:\Arimateia\6% ligante CP 2 - 2 leitura.D003
 Template file name: 122
 Test date & time: 6/2/2013 16:28:12
 Project: Arimateia
 Operator: Leda
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 50

Peak loading force (N): 1528
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: 6% ligante CP 2
 Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	65,0	65,1	64,7	64,8			64,9	0,2
Diameter (mm)	99,9	99,7	99,8	99,7			99,8	0,1

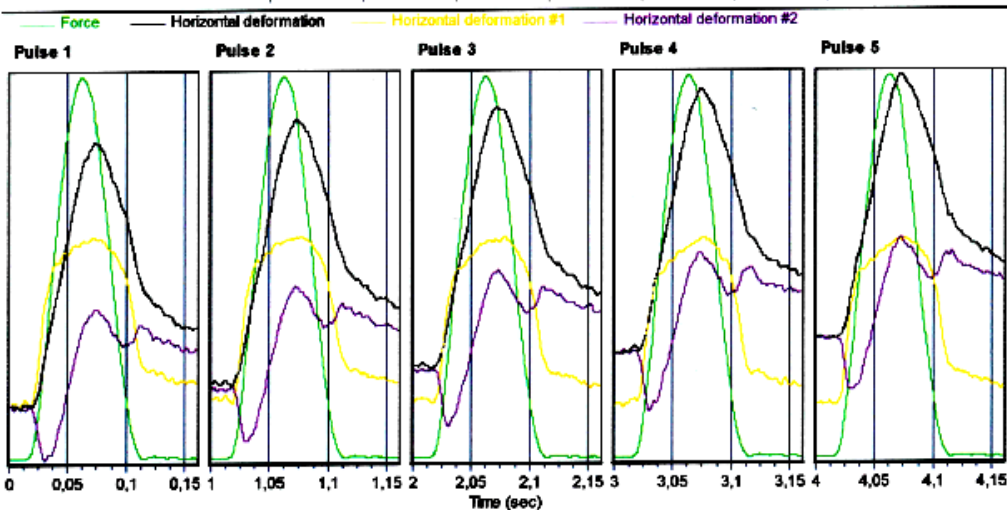
Cross-sectional area (mm²): 7820,6

Test Results

Conditioning pulses: 50
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l def'n/pulse (µm): 0,310600

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	8677	8485	8526	8478	8397	8513	92,44	1,42
Total recoverable horiz. deform. (µm)	2,36	2,43	2,42	2,44	2,47	2,42	0,03	1,36
Peak loading force (N)	1528	1526	1529	1529	1527	1528	0,76	0,05
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	1,59	1,61	1,61	1,63	1,62	1,61	0,01	0,71
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	0,77	0,82	0,81	0,81	0,85	0,81	0,03	3,13
Seating force (N)	153	153	152	152	152	152	0,60	0,39



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvds only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: C:\Armatela\Módulo de Resistência 5% ao ligante\5%PET_ligante - CP5.D003
 Template file name: 122
 Test date & time: 27/3/2013 10:30:26
 Project: Pavimentação
 Operator: Armatela
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1349
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: 5%PET/ligante - CP5
 Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	64,9	65,1	65,2	65,0			65,0	0,1
Diameter (mm)	99,8	99,8	99,1	99,5			99,5	0,3

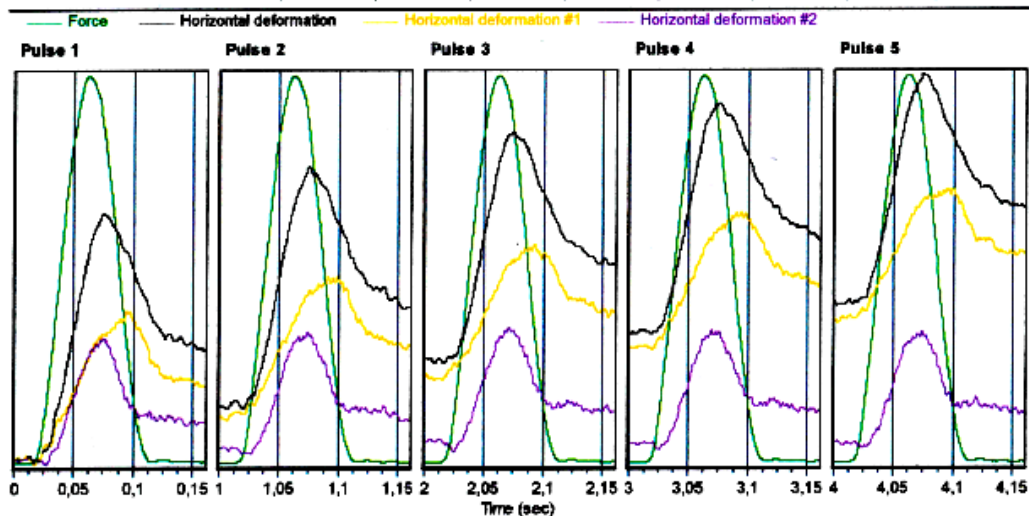
Cross-sectional area (mm²): 7775,6

Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz defn/pulse (µm): 0,589400

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	9195	9211	8837	8888	8873	9021	155,19	1,72
Total recoverable horiz. deform. (µm)	1,51	1,51	1,57	1,56	1,55	1,54	0,02	1,61
Peak loading force (N)	1351	1351	1348	1348	1347	1349	1,67	0,12
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	0,64	0,66	0,67	0,70	0,68	0,68	0,02	3,48
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	0,87	0,85	0,90	0,86	0,85	0,87	0,02	2,12
Seating force (N)	135	135	135	134	134	135	0,39	0,29



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvds only, assumed Poisson's ratio)

Data fileName: C:\Arimateia\Módulo de Resistência 5% ao ligante\5%PET_ligante - CP5 - 2 leitura.D003

Template file name: 122

Test date & time: 27/3/2013 10:31:06

Project: Pavimentação

Operator: Arimateia

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25

Loading pulse width (ms): 100

Pulse repetition period (ms): 1000

Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1349

Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: 5%PET/ligante - CP5

Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	84,9	85,1	85,2	85,0			85,0	0,1
Diameter (mm)	99,8	99,6	99,1	99,5			99,5	0,3
Cross-sectional area (mm²): 7775,6								

Test Results

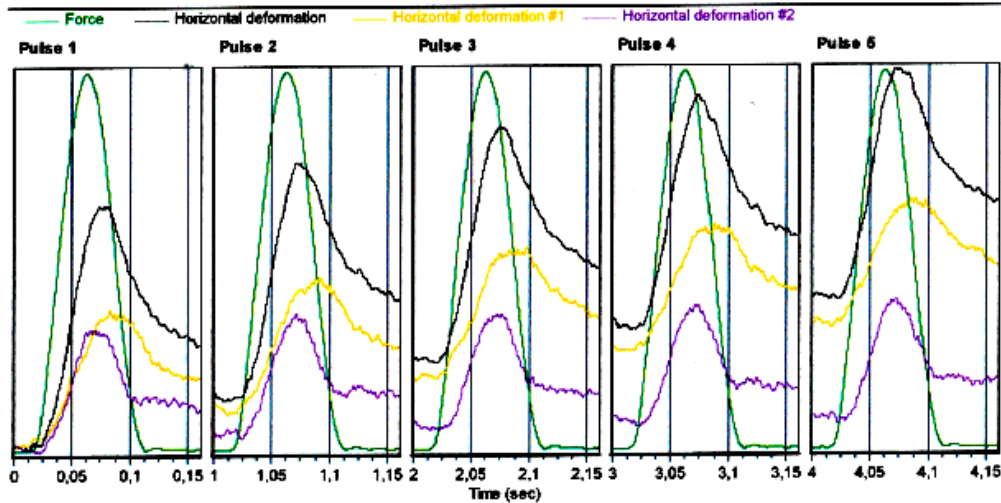
Conditioning pulses: 5

Core temperature (°C): 29,4

Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horiz'l def'n/pulse (µm): 0,538000

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	9848	9178	9348	8898	8097	9214	286,27	2,89
Total recoverable horiz. deform. (µm)	1,45	1,51	1,49	1,56	1,55	1,51	0,04	2,79
Peak loading force (N)	1354	1350	1352	1350	1353	1352	1,60	0,12
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	0,69	0,66	0,72	0,71	0,69	0,69	0,02	2,77
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	0,76	0,85	0,77	0,85	0,86	0,82	0,05	5,61
Seating force (N)	134	135	134	135	133	134	0,48	0,36



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: ASTM D4123-82 / AASHTO TP31 (horiz. lvts only, assumed Poisson's ratio)
 Data fileName: C:\Armatela\Módulo de Resiliência 5% ao ligante\5%PET_ligante - CP4.D003
 Template file name: 122
 Test date & time: 27/3/2013 10:24:52
 Project: Pavimentação
 Operator: Armatela
 Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 25
 Loading pulse width (ms): 100
 Pulse repetition period (ms): 1000
 Conditioning pulse count: 5

Peak loading force (N): 1349
 Estimated Poisson's ratio: 0.4

Seating force: AASHTO TP31 (10% of peak)

Specimen Information

Identification: 5%PET/ligante - CP4
 Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	64,2	64,3	64,2	64,1			64,2	0,1
Diameter (mm)	99,7	100,0	99,8	100,0			99,9	0,2

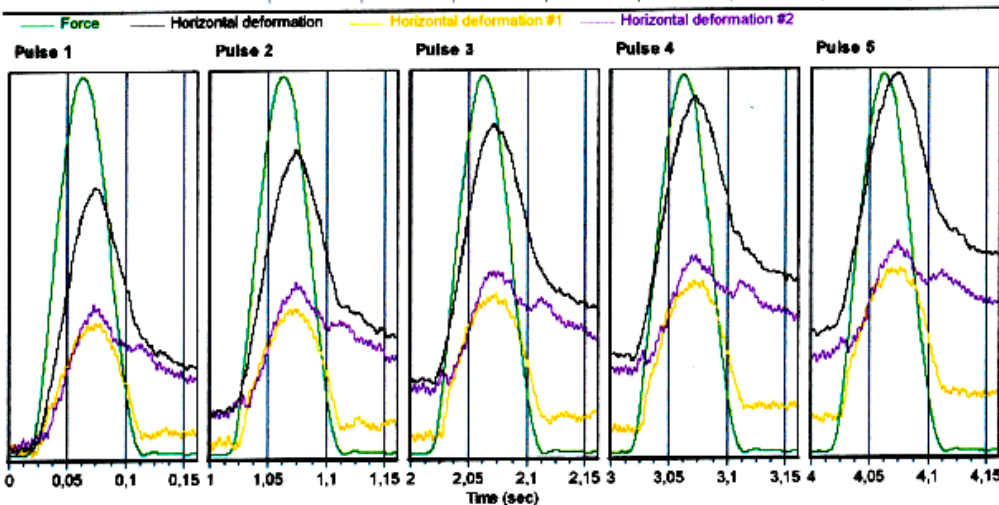
Cross-sectional area (mm²): 7832,4

Test Results

Conditioning pulses: 5
 Core temperature (°C): 29,4
 Skin temperature (°C): 29,4

Perm't horizl defn/pulse (µm): 0,424900

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Resilient modulus (MPa)	7728	7630	7583	7506	7416	7573	105,74	1,40
Total recoverable horiz. deform. (µm)	1,82	1,84	1,85	1,88	1,90	1,86	0,03	1,54
Peak loading force (N)	1345	1348	1347	1350	1351	1348	2,08	0,15
Recoverable horiz. deform. #1 (µm)	0,98	1,00	1,08	1,06	1,12	1,04	0,06	5,33
Recoverable horiz. deform. #2 (µm)	0,86	0,85	0,79	0,82	0,78	0,82	0,03	3,61
Seating force (N)	135	134	134	134	134	134	0,34	0,26



APÊNDICE B – Viscosidade Rotacional para o CAP Puro, com 4%, 5%, 6% e CAP Modificado

Rheocalc V3.3 Build 49-1				Brookfield Engineering Labs				
File: E:\ARIMATEIA\DOCTORADO\CAP PURO\CAP ORIGINAL\AMOSTRA 1.DB								
Test Date: 19/4/2012		Test Time: 15:11:33		Model: RV		Spindle: SC4-21		
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	375,00	20,00	15,0	69,75	18,60	135,3	135,1	00:20:15,6
2	185,00	50,00	18,5	86,03	46,50	150,1	150,0	00:38:24,2
3	68,00	100,00	13,6	63,24	93,00	177,1	177,0	00:39:42,6

Notes:

Rheocalc V3.3 Build 49-1					Brookfield Engineering Labs			
File: E:\ARIMATEIA\DOCTORADO\CAP PURO\CAP ORIGINAL\AMOSTRA 2.DB								
Test Date: 19/4/2012			Test Time: 15:12:03		Model: RV		Spindle: SC4-21	
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	380,00	20,00	15,2	70,68	18,60	134,6	135,0	00:20:01,9
2	189,00	50,00	18,9	87,89	46,50	149,8	150,1	00:39:16,5
3	69,00	100,00	13,8	64,17	93,00	176,6	177,0	00:41:22,8

Notes:

Rheocalc V3.3 Build 49-1					Brookfield Engineering Labs			
File: E:\ARIMATEIA\DOCTORADO\CAP PURO\CAP NOVO\AMOSTRA 20-09.DB								
Test Date: 20/9/2012		Test Time: 10:39:28			Model: RV		Spindle: SC4-21	
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	415,00	20,00	16,6	77,19	18,60	135,3	134,9	00:20:01,8
2	204,00	50,00	20,4	94,86	46,50	150,3	150,0	00:38:35,4
3	76,00	100,00	15,2	70,68	93,00	177,4	176,9	00:40:22,5

Notes:

Rheocalc V3.3 Build 49-2					Brookfield Engineering Labs			
File: E:\ARIMATEIA\DOCTORADO\CAP COM PET\CAP 5%\AMOSTRA 1.DB								
Test Date: 12/3/2013			Test Time: 16:48:06		Model: RV		Spindle: SC4-21	
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	645,00	20,00	25,8	119,97	18,60	135,3	135,0	00:20:01,9
2	267,00	50,00	26,7	124,16	46,50	150,0	149,8	00:38:21,9
3	87,50	100,00	17,5	81,38	93,00	177,2	177,0	00:39:32,1

Notes:

Rheocalc V3.3 Build 49-2					Brookfield Engineering Labs			
File: E:\ARIMATEIA\DOCTORADO\CAP COM PET\CAP 5%\AMOSTRA 2.DB								
Test Date: 12/3/2013			Test Time: 16:48:26		Model: RV		Spindle: SC4-21	
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	702,50	20,00	28,1	130,67	18,60	134,7	134,9	00:20:01,4
2	280,00	50,00	28,0	130,20	46,50	149,7	149,8	00:39:15,7
3	91,50	100,00	18,3	85,10	93,00	176,5	176,8	00:40:35,3

Notes:

Rheocalc V3.3 Build 49-2					Brookfield Engineering Labs			
File: E:\ARIMATEIA\DOCTORADO\CAP PURO\CAP ORIGINAL\AMOSTRA 1.DB								
Test Date: 19/4/2012		Test Time: 15:11:33			Model: RV		Spindle: SC4-21	
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	375,00	20,00	15,0	69,75	18,60	135,3	135,1	00:20:15,6
2	185,00	50,00	18,5	86,03	46,50	150,1	150,0	00:38:24,2
3	68,00	100,00	13,6	63,24	93,00	177,1	177,0	00:39:42,6

Notes:

Rheocalc V3.3 Build 49-2					Brookfield Engineering Labs			
File: E:\ARIMATEIA\DOCTORADO\CAP PURO\CAP ORIGINAL\AMOSTRA 2.DB								
Test Date: 19/4/2012			Test Time: 15:12:03		Model: RV		Spindle: SC4-21	
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	380,00	20,00	15,2	70,68	18,60	134,6	135,0	00:20:01,9
2	189,00	50,00	18,9	87,89	46,50	149,8	150,1	00:39:16,5
3	69,00	100,00	13,8	64,17	93,00	176,6	177,0	00:41:22,8

Notes:

Rheocalc V3.3 Build 49-2				Brookfield Engineering Labs				
File: E:\ARIMATEIA\DOCTORADO\CAP COM PET\CAP 4%\AMOSTRA 1.DB								
Test Date: 9/4/2013		Test Time: 11:13:19			Model: RV		Spindle: SC4-21	
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	715,00	20,00	28,6	132,99	18,60	134,8	135,1	00:20:01,1
2	332,00	50,00	33,2	154,38	46,50	150,1	150,2	00:39:18,6
3	104,00	100,00	20,8	96,72	93,00	176,5	176,8	00:40:36,2

Notes:

Rheocalc V3.3 Build 49-2**Brookfield Engineering Labs****File:** E:\ARIMATEIA\DOCTORADO\CAP COM PET\CAP 4%\AMOSTRA 2.DB**Test Date:** 9/4/2013 **Test Time:** 16:02:42**Model:** RV**Spindle:** SC4-21**Sample Name:** (Sample)

#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	707,50	20,00	28,3	131,59	18,60	135,2	135,0	00:20:02,2
2	333,00	50,00	33,3	154,84	46,50	149,9	149,8	00:38:25,5
3	103,50	100,00	20,7	96,25	93,00	177,2	177,0	00:39:38,5

Notes:

Rheocalc V3.3 Build 49-2					Brookfield Engineering Labs			
File: E:\ARIMATEIA\DOCTORADO\CAP COM PET\CAP 5%\AMOSTRA 2.DB								
Test Date: 12/3/2013			Test Time: 16:48:26		Model: RV		Spindle: SC4-21	
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	702,50	20,00	28,1	130,67	18,60	134,7	134,9	00:20:01,4
2	280,00	50,00	28,0	130,20	46,50	149,7	149,8	00:39:15,7
3	91,50	100,00	18,3	85,10	93,00	176,5	176,8	00:40:35,3

Notes:

Rheocalc V3.3 Build 49-2					Brookfield Engineering Labs			
File: E:\ARIMATEIA\DOCTORADO\CAP COM PET\CAP 5%\AMOSTRA 1.DB								
Test Date: 12/3/2013			Test Time: 16:48:06		Model: RV		Spindle: SC4-21	
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	645,00	20,00	25,8	119,97	18,60	135,3	135,0	00:20:01,9
2	267,00	50,00	26,7	124,16	46,50	150,0	149,8	00:38:21,9
3	87,50	100,00	17,5	81,38	93,00	177,2	177,0	00:39:32,1

Notes:

Rheocalc V3.3 Build 49-2**Brookfield Engineering Labs****File:** E:\ARIMATEIA\DOCTORADO\CAP COM PET\CAP 68\AMOSTRA 2.DB**Test Date:** 9/4/2013 **Test Time:** 16:03:00**Model:** RV**Spindle:** SC4-21**Sample Name:** (Sample)

#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	715,00	20,00	28,6	132,99	18,60	134,7	134,9	00:20:01,6
2	322,00	50,00	32,2	149,73	46,50	149,9	150,0	00:39:20,4
3	101,00	100,00	20,2	93,93	93,00	176,9	177,2	00:40:40,2

Notes:

Rheocalc V3.3 Build 49-2					Brookfield Engineering Labs			
File: E:\ARIMATEIA\DOCTORADO\CAP COM PET\CAP 6%\AMOSTRA 1.DB								
Test Date: 9/4/2013		Test Time: 11:14:10			Model: RV		Spindle: SC4-21	
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	677,50	20,00	27,1	126,02	18,60	135,1	134,9	00:20:20,6
2	306,00	50,00	30,6	142,29	46,50	150,1	149,9	00:38:21,5
3	98,00	100,00	19,6	91,14	93,00	177,3	177,1	00:39:34,7

Notes:

Rheocalc V3.3 Build 49-2					Brookfield Engineering Labs			
File: E:\ARIMATEIA\DOCTORADO\CAP ENVELHECIDO\CAP PURO\AMOSTRA 1.DB								
Test Date: 26/7/2013 Test Time: 10:55:46					Model: RV		Spindle: SC4-21	
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	547,50	20,00	21,9	101,83	18,60	134,6	134,9	00:20:02,6
2	259,00	50,00	25,9	120,44	46,50	149,8	150,0	00:38:37,8
3	89,00	100,00	17,8	82,77	93,00	176,8	177,1	00:40:41,3

Notes:

Rheocalc V3.3 Build 49-2					Brookfield Engineering Labs			
File: E:\ARIMATEIA\DOCTORADO\CAP ENVELHECIDO\CAP PURO\AMOSTRA 2.DB								
Test Date: 26/7/2013			Test Time: 13:09:35		Model: RV		Spindle: SC4-21	
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	532,50	20,00	21,3	99,05	18,60	134,8	135,1	00:22:38,3
2	254,00	50,00	25,4	118,11	46,50	149,6	149,8	00:38:39,2
3	88,00	100,00	17,6	81,84	93,00	176,8	177,1	00:40:41,2

Notes:

Rheocalc V3.3 Build 49-2					Brookfield Engineering Labs			
File: E:\ARIMATEIA\DOCTORADO\CAP ENVELHECIDO\CAP 4\AMOSTRA 1.DB								
Test Date: 26/7/2013			Test Time: 10:56:09		Model: RV		Spindle: SC4-21	
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	705,00	20,00	28,2	131,13	18,60	135,3	134,9	00:20:01,8
2	324,00	50,00	32,4	150,66	46,50	150,1	149,8	00:38:19,4
3	106,50	100,00	21,3	99,05	93,00	177,2	176,9	00:39:32,0

Notes:

Rheocalc V3.3 Build 49-2					Brookfield Engineering Labs			
File: E:\ARIMATEIA\DOCTORADO\CAP ENVELHECIDO\CAP 4%\AMOSTRA 2.DB								
Test Date: 26/7/2013			Test Time: 13:07:32		Model: RV		Spindle: SC4-21	
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	645,00	20,00	25,8	119,97	18,60	135,1	134,9	00:20:02,5
2	300,00	50,00	30,0	139,50	46,50	150,1	150,0	00:38:21,1
3	100,50	100,00	20,1	93,47	93,00	177,3	177,1	00:39:35,6

Notes:

Rheocalc V3.3 Build 49-2					Brookfield Engineering Labs			
File: E:\ARIMATEIA\DOCTORADO\CAP ENVELHECIDO\CAP 5%\AMOSTRA 1.DB								
Test Date: 30/7/2013		Test Time: 11:46:22			Model: RV		Spindle: SC4-21	
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	852,50	20,00	34,1	158,57	18,60	135,2	135,0	00:20:02,3
2	383,00	50,00	38,3	178,09	46,50	150,1	149,9	00:38:20,2
3	121,00	100,00	24,2	112,53	93,00	177,4	177,2	00:39:33,7

Notes:

Rheocalc V3.3 Build 49-2					Brookfield Engineering Labs			
File: E:\ARIMATEIA\DOCTORADO\CAP ENVELHECIDO\CAP 6%\AMOSTRA 2.DB								
Test Date: 30/7/2013			Test Time: 14:03:14		Model: RV		Spindle: SC4-21	
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	832,50	20,00	33,3	154,84	18,60	134,8	135,2	00:20:02,0
2	376,00	50,00	37,6	174,84	46,50	149,7	149,9	00:38:39,4
3	119,50	100,00	23,9	111,14	93,00	176,7	177,0	00:40:45,2

Notes:

Rheocalc V3.3 Build 49-2					Brookfield Engineering Labs				
File: E:\ARIMATEIA\DOCTORADO\CAP ENVELHECIDO\CAP 6%\AMOSTRA 1.DB									
Test Date: 30/7/2013 Test Time: 11:46:43					Model: RV		Spindle: SC4-21		
Sample Name: (Sample)									
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm ²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)	
1	850,00	20,00	34,0	158,10	18,60	134,6	134,9	00:20:01,6	
2	381,00	50,00	38,1	177,17	46,50	150,0	150,2	00:38:39,7	
3	121,50	100,00	24,3	113,00	93,00	176,7	177,1	00:40:36,5	

Notes:

Rheocalc V3.3 Build 49-2					Brookfield Engineering Labs			
File: E:\ARIMATEIA\DOCTORADO\CAP ENVELHECIDO\CAP 5%\AMOSTRA 2.DB								
Test Date: 30/7/2013			Test Time: 14:03:28		Model: RV		Spindle: SC4-21	
Sample Name: (Sample)								
#	Viscosity (cP)	Speed (RPM)	% Torque (%)	Shear Stress (D/cm²)	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Bath (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	850,00	20,00	34,0	158,10	18,60	135,3	135,1	00:20:03,5
2	384,00	50,00	38,4	178,56	46,50	150,0	149,8	00:38:25,8
3	121,00	100,00	24,2	112,53	93,00	177,2	177,0	00:39:37,0

Notes: